

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем**

**Кафедра Телекомунікаційних систем**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Л.О. Уривський

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## **Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка**

**на тему: «Дослідження збільшення пропускної здатності фотонних  
лінійних трактів»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ТС-371мп

Чіжмодій Олександр Ярославович \_\_\_\_\_

Керівник:

Доцент кафедри телекомунікаційних систем

Канд.техн.наук, доцент

Бердников О.М. \_\_\_\_\_

Рецензент:

Професор кафедри телекомунікаційних систем

Доктор. техн. наук, професор

Романов Олександр Іванович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.  
Студент (-ка) \_\_\_\_\_

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем**

**Кафедра Телекомунікаційних систем**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»  
(172.3620.1 «Телекомунікаційні системи та мережі»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Л.О. Уривський

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Чіжмодію Олександрю Ярославовичу**

1. Тема дисертації «Дослідження збільшення пропускної здатності фотонних лінійних трактів», науковий керівник дисертації Бердников Олег Михайлович, доцент, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження: пропускна спроможність оптичних лінійних трактів.

4. Предмет дослідження методів збільшення пропускної спроможності оптичних лінійних трактів:

Вихідні дані:

1. Перспективні напрямки розвитку оптичних волокон.

2. Рівень розвитку, основні переваги та особливості застосування волоконно-оптичних систем передачі.

3. Параметри, що впливають на показники ефективності діючих волоконно-оптичних систем передачі.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Аналіз шляхів вирішення поставленої задачі.
2. Порівняння методів збільшення пропускної спроможності лінійних трактів.
3. Використання обраного методу на прикладі.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Дата видачі завдання 20.05.2018

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Підготовка і вивчення літератури	До 02.09.2018	
2	Розробка вступу	До 07.09.2018	
3	Розробка 1 розділу	До 20.09.2018	
4	Розробка 2 розділу	До 10.10.2018	
5	Розробка 3 розділу	До 15.11.2018	
6	Підготовка доповіді	До 15.11.2018	
7	Підготовка слайдів та інструкції	До 25.11.2018	
8	Подача роботи керівнику для складання відгуку	До 01.12.2018	
9	Подача роботи рецензенту	До 05.12.2018	
10	Оформлення роботи та подача в бібліотеку	До 12.12.2018	

Студент

О.Я. Чіжмодій

Науковий керівник дисертації

О.М. Бердников

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг магістерської дисертації складає 109 сторінок, на яких міститься 38 ілюстрацій та 52 формули, у додатку (А) містяться публікація, яка виконана під час роботи над даною темою. В роботі також є 10 посилань на інші джерела.

*Об'єкт:* Процес передачі інформації через оптоволоконний кабель у ВОСП.

*Предмет:* Підвищення пропускної спроможності ВОСП.

*Мета:* Аналіз шляхів підвищення пропускної спроможності ВОСП та розробка методики розрахунку ВОСП з підвищеною пропускною здатністю.

У першому розділі виконаний огляд сучасного рівня розвитку технологій транспортування потоків даних в ВОСП та дослідження підвищення пропускної спроможності на фізичному рівні .

У другому розділі виконано порівняння існуючих технологій підвищення пропускної спроможності транспортування інформаційних потоків в ВОСП та запропонована альтернативна схема мультиплексування потоків даних за допомогою технологій TDM та WDM.

У третьому розділі запропонована методика розрахунку ВОСП з підвищеною пропускною спроможністю транспортування інформаційних потоків.

В подальшому за допомогою матеріалів даної магістерської дисертації можливо підвищити пропускну здатність існуючої ВОСП без використання великих капіталовкладень, тобто використання нових ОК.

## ABSTRACT

The master's dissertation consists of introduction, three sections, conclusions, list of used sources and applications. The full volume of the master's dissertation is 108 pages, which contain 38 illustrations and 52 formulas; in one annex (A) there is a publication that was made while working on this topic. There are also 10 links to other sources in the work.

Object. The process of transmitting information through fiber optic cable to FOTS.

Subject. Increasing the flow capacity of FOTS.

Goal. Analysis of ways to increase the flow capacity of FOTS and the development of a method for calculating FOTS with high bandwidth.

In Section 1, an overview of the current level of development of technologies for the transport of data flows in FOTS and the study of increasing the capacity at the physical level.

In Chapter 2, a comparison is made of existing technologies for increasing the throughput of transporting information flows in FOTS, and an alternative scheme for data flow multiplexing with the help of TDM and WDM technologies is proposed.

Section 3 proposes a method for calculating FOTS with an increased flow capacity for the transport of information flows.

In the future, with the help of the materials of this Master's dissertation, it is possible to increase the capacity of the existing FOTS without the use of large investments, that is, the use of new OK.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	8
ВСТУП .....	10
РОЗДІЛ 1. РІВЕНЬ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ .....	13
1.1. Рівень розвитку, модифікації, основні переваги та особливості застосування волоконно-оптичних систем передачі .....	13
1.2 Многомодові волокна .....	19
1.3 Одномодові волокна .....	23
1.4 Основні типи волокон типу G.65x .....	25
1.4.1 Волокна G.652 .....	25
1.4.2 Волокна G.653 .....	27
1.4.3 Волокно G.654 .....	29
1.4.4 Волокна G.655 .....	31
1.4.5 Волокна G.656 .....	35
1.4.6 Волокна G.657 .....	36
1.5 Напрямки вдосконалення та подальший розвиток ВОСП .....	39
Висновки по розділу 1 .....	46
РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯННЯ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВОЛТ .....	47
2.1. Постановка проблеми та шляхи її вирішення .....	47
2.2. Методи мультиплексування цифрових потоків .....	49
2.3. Порівняння методів збільшення пропускної спроможності .....	52
2.4. Структурна схема альтернативної системи мультиплексування сигналу .....	56
2.5 Нелінійні оптичні явища. Проблеми збільшення пропускної здатності .....	62
2.5.1 Фазова автомодуляція (SPM) .....	63
2.5.2 Перехресна фазова модуляція .....	64
2.5.3 Чотирьох хвильове зміщення (FWM) .....	64
2.5.4 Раманівське розсіювання .....	65

2.5.5 Вимушене розсіяння Бріллюена-Мандельштама .....	66
Висновки по розділу 2 .....	69
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ ВОСП З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ WDM .....	71
3.1 Структура ОЛТ ВОСП з WDM .....	71
3.2 Вибір типу джерела випромінювання і фотоприймача, їх параметри ....	72
3.3 Оцінка параметрів оптичного волокна .....	78
3.3.1 Вибір робочої довжини хвилі .....	78
3.3.2 Розрахунок пропускної здатності ОВ .....	82
3.3.3 Побудова планів частот фотонного лінійного тракту .....	89
3.3.4 Розрахунок параметрів передачі оптичних волокон .....	96
3.3.5 Розрахунок параметрів елементарної кабельної ділянки ВОЛП .....	97
Висновки по розділу 3 .....	115
ВИСНОВКИ .....	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	118
ДОДАТОК А .....	120

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

APD (avalanche photodiode)- лавинний фотодіод

FDM – Frequency-Division Multiplexing

*PDH* – Plesiochronous Digital Hierarchy

PDM – Polarization-Division Multiplexing

TDM – Time Division Multiplexing

WDM - Wavelength Division Multiplexing

АТС - атоматична телефонна станція

АСП – аналогова система передачі

ВС - волоконний світловод

ВП - вікно прозорості

ВОЛЗ - волоконно-оптична система зв'язку

ВОСП - волоконно-оптична систем передачі

ДОВ - джерело оптичного випромінювання

ІКМ - імпульсно-кодова модуляція

КЕМ - квантово-електронний модуль

ЛД - лазерний діод

М - модулятор

НРП - необслуговуваний ретрансляційний пункт

ОТр - оптичний тракт

ОВ - оптичне волокно

ОЛТ - оптичний лінійний тракт;

ОК - оптичний кабель

ОТМ - оптична транспортна мережа

ОП - оптичний підсилювач

ОЦК - основний цифровий канал

ПрОМ - передавальний оптоелектронний модуль

ПОМ - приймальний оптоелектронний модуль



СВД - світловипромінюючий діод

СРК - спектральне розподілення каналів

ТТС - телекомунікаційна транспортна система

ТЧ - тональна частота

ТТМ - телекомунікаційна транспортна мережа

ФД - фотодіод

ФНЧ - фільтр нижніх частот

ХМ – хвильове мультиплексування

ЦСП - цифрова система передачі

ЦОЛТ - цифровий оптичний лінійний тракт

## ВСТУП

На даний момент системи зв'язку стали однією з причин для швидкого та ефективного розвитку суспільства, а кількість інформації, яка почала передаватись по системам зв'язку експоненціально зростає з появою у 1991 році Всесвітньої паутини, яка стала доступною для загального користування. Всесвітня паутина набирає популярність, а зростання пропускної здатності для передачі даних у каналах зв'язку набагато перевищує всі найсміливіші прогнози (рис. 1.)

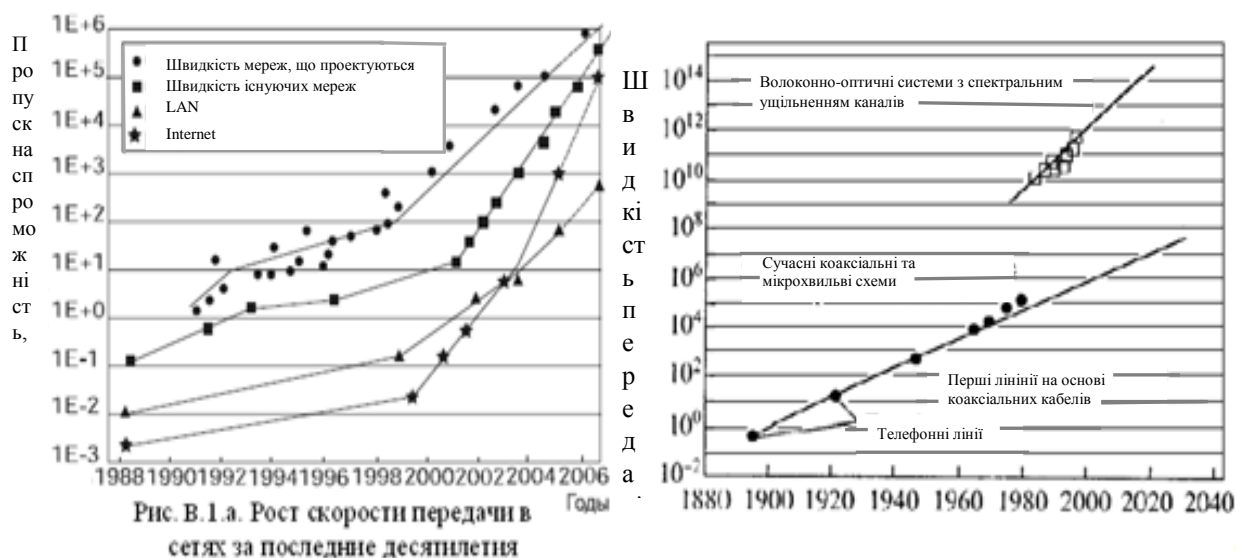


Рисунок 1. Збільшення споживання пропускної спроможності

Це висуває нові вимоги до сучасних мереж зв'язку, їх пропускної здатності. В даний час задовольнити потреби людського суспільства у передачі інформації можна тільки на основі волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП).

До основних переваг ВОСП відносяться: висока стійкість; слабка залежність якості передачі від довжини лінії; стабільність параметрів каналів волоконно-оптичних систем передачі, можливість побудови цифрової мережі зв'язку; і найголовніше – високі техніко-економічні показники. Проведемо порівняльний аналіз основних середовищ передачі. Для порівняння різних

середовищ передачі і систем зв'язку розглянемо основні характеристики які занесені до (табл. 1)

Таблиця 1. Порівняльні характеристики різних середовищ передачі сигналу

Характери-стика	Кабелі			Радіорелейні лінії	Супутникові системи
	Симетричні	Коаксіальні	Оптичні		
Частота, швидкість передачі	Низька	Середня	Висока	Середня	Висока
Ємність	Низька	Середня	Висока	Середня	Висока
Відстань	Мала	Середня	Велика	Середня	Велика
Якість передачі	Середня	Висока	Дуже Висока	Залежить від кліматичних умов	Висока
Захищеність	Низька	Середня	Висока	Висока	Середня
Надійність	Низька	Середня	Висока	Низька	Середня
Якість лінії	Середня	Висока	Висока	Середня	Середня
Затрати на обладнання лінії	Середні	Середні	Великі	Великі	Дуже великі
Середні затрати на обладнання лінії	Середні	Високі	Середні	Середні	Середні
Затрати на будівництво	Середні високі	Середні Високі	Середні високі	Високі	Дуже високі
Середні затрати на абонентську лінію	Низькі	Середні	Високі	Середні	Дуже високі

Високошвидкісні волоконно-оптичні системи передачі широко використовуються на магістральних і зонових мережах зв'язку країни. Пояснюється це тим, що ОВ володіє дуже широкою смугою пропускання.

З вище сказаного можна сформулювати мету магістерської дисертації, яка полягає у збільшенні пропускної спроможності ВОСП.

Для досягнення поставленої мети потрібно рішення наступних завдань:

- знайти найбільш ефективний метод збільшення пропускної спроможності;
- підібрати телекомунікаційну технологію, в рамках якої буде працювати магістральна система передачі;
- вибрати і розрахувати параметри елементів оптичного лінійного тракту (ОЛТ);

Актуальність роботи обґрунтовується наступними фактами. По-перше, результати роботи можуть бути використані в навчальному процесі при вивченні дисципліни "Волоконно-оптичні системи передачі" студентами ВНЗ. По-друге, матеріали, опубліковані в підручниках носять розрізнений характер, і його систематизація та уніфікація є актуальним завданням. По-третє, як відомо, передбачається розвиток NGN (next generation networks) мереж, які потребуватимуть більшої пропускної здатності оптичних лінійних трактів телекомунікаційних транспортних мереж. В їх основі лежать пакетні технології, які можуть спиратися безпосередньо на шар оптичних каналів. За допомогою технології спектрального ущільнення це легко піддається реалізації.

## РОЗДІЛ 1. РІВЕНЬ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

### 1.1 Рівень розвитку, модифікації, основні переваги та особливості застосування волоконно-оптичних систем передачі

У нинішній час перевага для організації зв'язку по волоконно-оптичним лініям, надаються цифровим системам передачі (ЦСП). Це зумовлено не тільки загальними перевагами ЦСП у порівнянні з аналоговими системами передачі (АСП), але й особливостями роботи та побудови ВОСП.

Розглянемо основні особливості:

Для одержання необхідної якості передачі інформації в АСП потрібні спеціальні засоби приймання та обробки оптичних сигналів. ЦСП забезпечують необхідну якість передачі інформації при відношенні сигнал/шум на 30-40дБ менше, ніж АСП. Тому реалізація ВОСП з використанням ЦСП значно простіша у порівнянні з АСП. Переваги ЦСП: висока заводо захищеність, стійкість до нелінійних спотворень, незалежність якості передачі від довжини лінії зв'язку, стабільність параметрів каналу зв'язку та інші.

Розглянемо головні елементи організації ВОСП. Як і системи, що використовують традиційні кабелі з мідними провідниками, волоконно-оптичні системи передачі є провідними, бо сигнали оптичного діапазону передаються по направляючій системі – волоконним світловодам. Тільки середовище передачі та форма сигналів в лінії ВОСП відрізняють від традиційних провідних ліній передачі. Тому побудова ВОСП аналогічна побудові будь-якої провідної багатоканальної системи передачі, в складі якої є кінцеві та проміжні станції, з'єднанні безперервною направляючою системою. На (рис 1.1.1) наведена узагальнена структура ВОСП (для одного напрямку передачі).

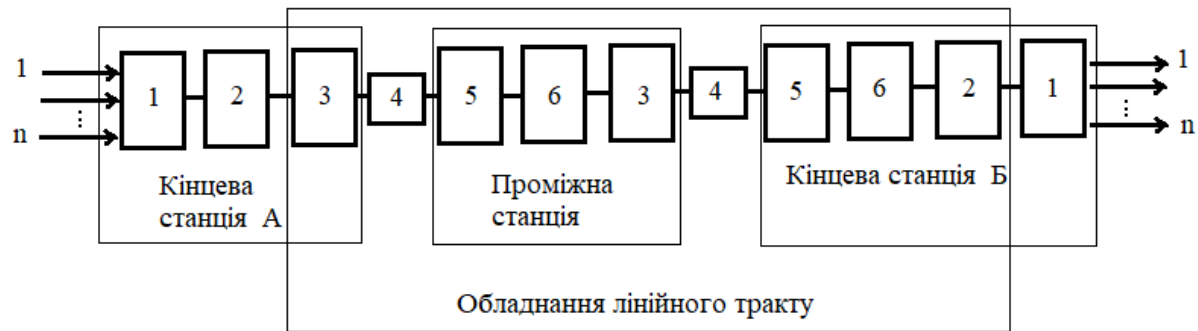


Рисунок 1.1.1 Узагальнена структура схема ВОСП  
(для одного напрямку передачі)

1. Типова кінцева апаратура багатоканальної схеми передачі;
2. Апаратура спряження;
3. Передавальний оптоелектронний модуль (ПрОМ);
4. Оптичний кабель;
5. Приймальний оптоелектронний модуль (ПОМ);
6. Електронний генератор.

На передавальній кінцевій станції А первинні сигнали тональної частоти (ТЧ) надходять на кінцевій тональну апаратуру, де об'єднуються в груповий сигнал, що подається на апаратуру спряження.

В ній електронний сигнал перетворюється у форму, необхідну для передачі по волоконно-оптичному лінійному тракту, тобто формується лінійний сигнал. Після цього в ПОМ здійснюється модуляція потужності несучої лінійним електричним сигналом і оптичний сигнал надходить в ОК. При розповсюдженні по кабелю оптичний сигнал послаблюється і спотворюється. Для збільшення дальності зв'язку через певні відстані вздовж лінії встановлюються проміжні станції (регенератори), що відновлюють форму сигналу і компенсують загасання (послаблення) в лінії.

В сучасних ВОСП у регенераторі проводиться обробка (підсилення, корекція, регенерація) електричного сигналу.

Тому на проміжній станції електричний сигнал на вході перетворюється в електричний, зворотнє перетворення відбувається на виході. Ці перетворення здійснюються в ПрОМ та ПОМ відповідно.

Проводяться розробки оптичних регенераторів на основі лазерних підсилювачів та оптичних транзисторів, в яких будуть відсутні проміжні перетворення оптичних сигналів в електричні та навпаки.

На приймальній кінцевій станції Б здійснюється перетворення оптичного сигналу в електричний, його регенерація, підсилення, відновлення до вигляду первинного сигналу на вході кінцевої станції А.

Відмінність ВОСП від традиційних проводових систем передачі, яка впливає з розглянутої структурованої схеми, полягає у тому, що інформація передається за допомогою оптичних сигналів, що супроводжується встановленням спеціальних додаткових приладів (ПОМ та ПрОМ на кінцевих та проміжних станціях і апаратури спряження на кінцевих станціях).

Сучасні ВОСП являють собою поєднання оптичного лінійного тракту, який містить ПОМ, ПрОМ, ОК з уніфікованою каналоутворюючою апаратурою та апаратурою групоутворення ЦСП різних ступенів ієрархії.

Тому вони мають уніфіковані параметри стику, що дозволяє легко організувати лінії передачі з застосуванням інших сериовищ розповсюдження.

Основні характеристики ВОСП визначаються параметрами кінцевої та проміжної апаратури лінійного тракту і параметрами ОК:

- кількість каналів тональної частоти;
- швидкість передачі (для ЦСП) або смуга частот (для АСП) ;
- швидкість передачі в оптичному лінійному тракті
- лінійний код;
- коефіцієнт помилок (на регенератор) ;
- енергетичний запас;
- межі автоматичного регулювання підсилення;
- енергетичний потенціал;
- максимальна довжина ділянки регенерації (для визначення загасання ОВ) ;

- кількість проміжних станцій;
- максимальна довжина лінійного тракту;
- довжина хвилі оптичної несучої;
- згасання оптичного кабелю;
- тип джерела випромінювання;
- тип приймача оптичного випромінювання;
- рекомендований тип ОК.

У відповідності з цим, логічно провести класифікацію оптичних систем у відповідності з їх властивостями та межами застосування.

По середовищем розповсюдження оптичні системи поділяються на:

- системи з атмосферним оптичним каналом;
- системи з волоконно-оптичним каналом.

Системи з атмосферним оптичним каналом застосовуються для зв'язку із:

- рухомими об'єктами в межах прямого бачення;
- для зв'язку між рухомими апаратами у космічному просторі;
- в робототехніці;
- для релейних вставок оптичного діапазону у волоконно-оптичних лініях зв'язку.

В цих системах використовується інтервал довжин хвиль від 0,4 до 10 мкм, тобто видимий діапазон, ближній і середній інфрачервоний діапазон.

В системах з атмосферним оптичним каналом використовується розподіл каналів по довжині хвилі оптичної несучої, просторовий розподіл каналів, розподіл каналів по поляризації.

По галузі застосування ВОСП поділяються на:

- системи для мереж та ліній зв'язку усіх ступенів ієрархії, тобто магістральні, зонові, ВОСП місцевих мереж;
- системи для інформаційно-обчислювальних мереж різноманітних рівнів ієрархії, в тому числі локальних, регіональних, корпоративних, глобальних;
- системи для мереж автоматизованих систем управління ;
- системи з волоконно-оптичними передавачами;



- системи кабельного телебачення. ;

По засобам розподілу каналів ВОСП поділяються на:

- системи з частотним розподілом каналів або аналогові;
- системи з часовим розподілом каналів або цифрові;
- системи з спектральним розподілом каналів (СРК) .

Аналогові ВОСП застосовуються у вимірювальних системах, в яких інформація про стан об'єкта міститься в частоті або фазі електричного сигналу. Системи із спектральним розподілом каналів (оптичним мультиплексуванням) є аналогом систем з традиційним частотним розподілом каналів, але розподіл відбувається в оптичному діапазоні. Для передачі інформації в цих системах використовуються різні оптичні несучі, сукупність яких розповсюджується по одному ОВ. Такі системи дозволяють повніше використовувати потенційну широкопasmовість ОВ.

Дослідження та розробки в техніці волоконно-оптичного зв'язку направлені на:

- збільшення дальності зв'язку без проміжного підсилення сигналів;
- засвоєння всього ближнього інфрачервоного діапазону;
- створення систем з безпосереднім підсиленням інфрачервоного оптичного сигналу;
- створення пристроїв оптичної обробки сигналів.

Можливість збільшення обсягів інформації, яка передається, реалізується при застосуванні ВОСП, які мають більш широкую смугу пропускання. В останній час знайшли широке застосування оптичні кабелі другого покоління. Параметри передачі яких оптимізовані для другого та третього вікон прозорості, ці кабелі випускаються вітчизняною промисловістю. На мережах зв'язку України, широко використовуються ВОСП для ліній зв'язку всіх ступенів ієрархії: магістральних, зонових, місцевих.

Застосування ВОСП доцільно, економічно і ефективно на всіх ділянках Єдиної Національної Мережі Зв'язку України. Це не тільки підвищує

техніко-економічні показники галузі зв'язку, але й забезпечує можливість поетапного переходу до цифрових мереж інтегрального обслуговування.

Особливо актуальне впровадження ВОСП у нинішній час, коли різко скоротилися запаси кольорових металів, особливо міді! Внаслідок чого вартість електричних кабелів різко зростає, а вартість оптичних кабелів має тенденцію до зниження.

Оптичне волокно в даний час вважається найдосконалішим фізичним середовищем для передачі інформації, а також найперспективнішим середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані. Підстави так вважати випливають з ряду особливостей, властивим оптичним хвилювачам. Оптичний діапазон на шкалі електромагнітних хвиль охоплює проміжок від 0,4 до 4 мкм (рис. 1.1.2), що відповідає частотам близько  $10^{14}$  Гц.

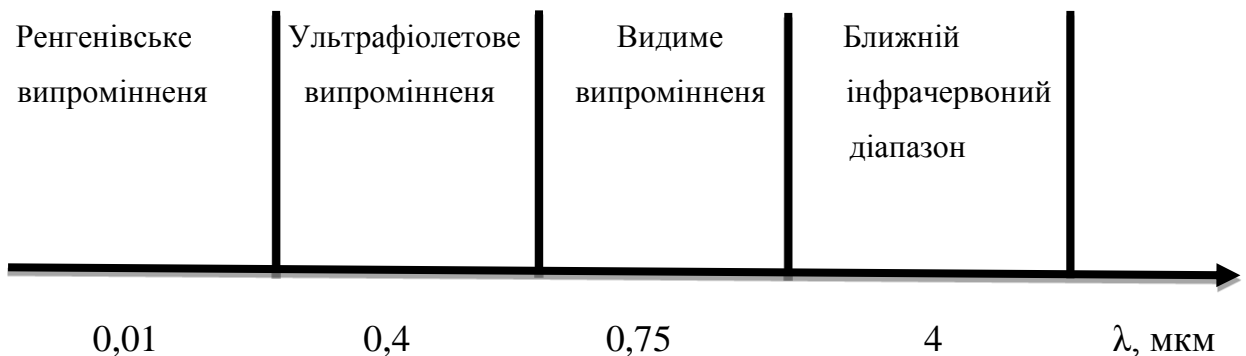


Рисунок 1.1.2 Шкала електромагнітних хвиль

Для передачі та обробки інформації використовується не тільки видима частина спектра електромагнітних хвиль, але й частина інфрачервоного діапазону. У системах волоконно-оптичного зв'язку використовується частина ближнього інфрачервоного діапазону з інтервалом довжин хвиль від 0,85 до 1,55 мкм, що визначається властивостями кварцового скла, в якому існують «вікна прозорості» (ВП).

## 1.2 Многомодові волокна

Оптичні волокна, у яких і серцевина, і оболонка виготовлені з кварцового скла, є найпоширенішим типом оптичних волокон. Кварцові оптичні волокна здатні передавати інформаційний сигнал у вигляді світлової хвилі на значні відстані, завдяки чому вже кілька десятиліть широко застосовуються в телекомунікаціях. Як відомо, всі кварцові волокна діляться на одномодові (SM - single-mode) і багатомодові (MM - multimode), в залежності від кількості розповсюджуваних мод оптичного випромінювання.

Одномодові волокна використовуються для високошвидкісної передачі даних на великі відстані, а багатомодові добре підходять для менш протяжних ліній. Спочатку мова піде про багатомодове волокно, його особливості, різновиди та області застосування. Варто відзначити, що багатомодовими бувають не тільки кварцові волокна, але і волокна, що виготовляються з інших матеріалів, наприклад, пластикове оптичне волокно (POF) і кварцове волокно з полімерною оболонкою (HCS). В оптичному хвилеводі може одночасно поширюватися кілька просторових мод оптичного випромінювання. Кількість поширюваних мод залежить, зокрема, від геометричних розмірів оптоволокна. Волокно, в якому поширюється більше однієї моди оптичного випромінювання, називається багатомодовим.

В телекомунікаціях в основному застосовуються кварцові багатомодові волокна з діаметром серцевини і оболонки 50/125 і 62,5 / 125 мкм.

Многомодовое кварцове волокно має і серцевину, і оболонку з кварцового скла. В процесі виробництва шляхом легування вихідного матеріалу певними домішками досягається потрібний профіль показника заломлення. Якщо стандартне одномодове волокно має ступінчастий профіль показника заломлення (показник заломлення однаковий у всіх точках поперечного перерізу серцевини), то в разі багатомодового волокна найчастіше формується градієнтний профіль (показник заломлення плавно зменшується від

центральної осі серцевини до оболонки). Це робиться, для того щоб знизити вплив міжмодової дисперсії (рис. 1.2.1).

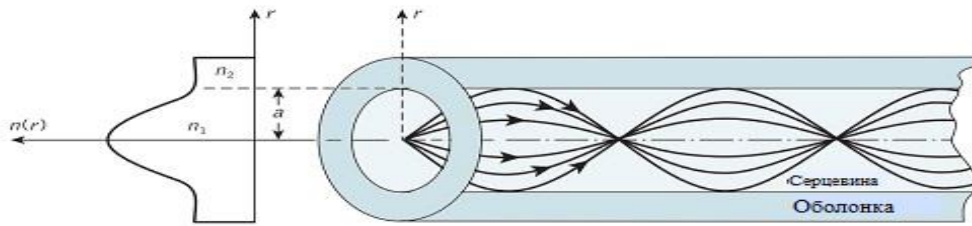


Рисунок 1.2.1 Градієнтне багатомодове волокно

Кварцеве волокно має спектральну характеристику загасання з трьома вікнами прозорості – близько довжин хвиль 850, 1300 і 1550 нм. Для роботи з багатомодовим волокном в основному використовуються довжини хвиль 850 і 1300 (1310) нм. Типові значення загасання на цих довжинах хвиль - 3,5 і 1,5 дБ / км відповідно. Для захисту волокна, на оптичну оболонку наноситься первинне покриття з полімерного матеріалу (найчастіше акрилу), яке фарбується в один з дванадцяти стандартних кольорів. Діаметр оптоволокна з покриттям зазвичай складає близько 250 мкм. Волоконно-оптичний кабель складається з одного або декількох волокон з первинним покриттям, а також різних зміцнюючих і захисних елементів. У найпростішому випадку багатомодовий оптичний кабель являє собою оптичне волокно, оточене кевларовими нитками і поміщене на зовнішню захисну оболонку оранжевого кольору (рис. 1.2.2).



Рисунок. 1.2.2 Побудова багатомодового кабелю

Через вплив міжмодової дисперсії (рис. 1.2.3) багатомодове волокно має обмеження в швидкості і дальності поширення інформації в порівнянні з одномодовим. Довжину багатомодових ліній зв'язку обмежує також велике в порівнянні з одномодовим волокном, загасання.

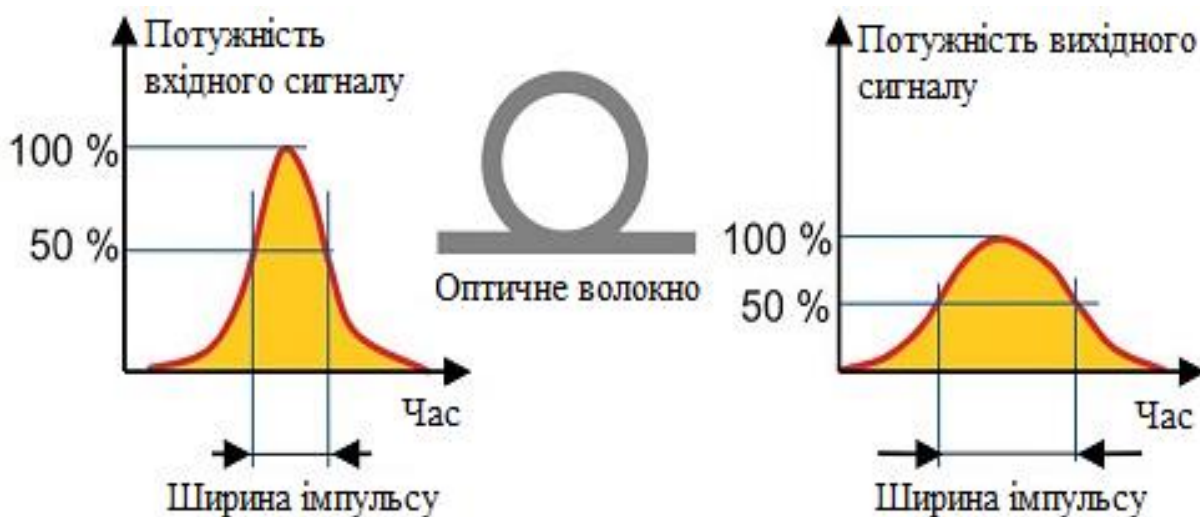


Рисунок 1.2.3 Розширення імпульсу в багатомодовому волокні в результаті міжмодової дисперсії

Збільшення трафіка призвело до появи волокон з серцевиною 62,5 мкм. Більший діаметр дозволяв більш ефективно використовувати випромінювання світлодіода, однак при цьому збільшувалася кількість розповсюджуваних мод, що негативно позначається на характеристиках передачі. Тому, коли замість світлодіодів стали використовуватися вузькоспрямовані лазери, популярність знову почало набувати волокно 50/125 мкм. Подальшому зростанню швидкості і дальності передачі інформації, сприяє поява волокон з градієнтним профілем показника заломлення.

Волокна, які використовуються зі світлодіодами, мали різні дефекти і неоднорідності біля осі серцевини, тобто в тій області, де зосереджена велика частина випромінювання лазера (рис. 1.2.4). Тому виникла необхідність в удосконаленні технології виробництва, що призвело до появи волокон, які стали називати «оптимізованими для роботи з лазерами» (laser-optimized fiber).

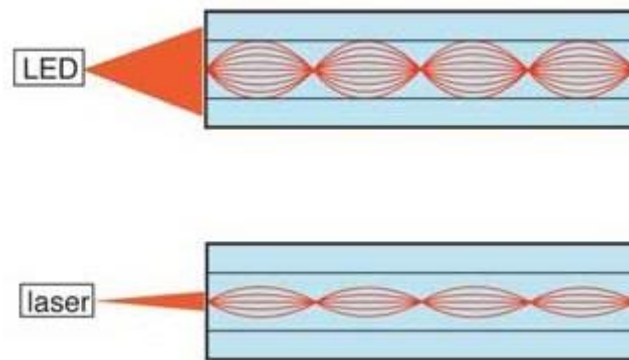


Рисунок 1.2.4. Різниця в поширенні випромінювання LED і лазера в оптичному волокні

Так з'явилася класифікація багатомодових кварцових волокон, вони позначаються OM (Optical Multimode) і цифрою, яка позначає клас волокна:

OM1– стандартне багатомодове волокно 62,5 / 125 мкм;

OM2 – стандартне багатомодове волокно 50/125 мкм;

OM3 – багатомодове волокно 50/125 мкм, оптимізоване для роботи з лазером;

OM4 – багатомодове волокно 50/125 мкм, оптимізоване для роботи з лазером, з поліпшеними характеристиками.

Для кожного класу в стандарті вказані значення загасання і ширини смуги пропускання. Дані представлені у (табл 1.2.1). Позначення OFL (overfilled launch) і EMB (effective modal bandwidth) вказують на різні методи визначення ширини смуги пропускання при використанні світлодіодів і лазерів відповідно.

Таблиця 1.2.1. Параметри багатомодових оптичних волокон різних класів.

Клас волокна	Загасання, дБ / км		Мінімальна ширина смуги пропускання (OFL), МГц * км		Мінімальна ширина смуги пропускання (EMB), МГц * км
	850 нм	1300 нм	850 нм	1300 нм	850 нм
OM1	3,5	1,5	200	500	-
OM2			500	500	-
OM3			1500	500	2000
OM4			3500	500	4700

Крім цих основних класів, випускається велика різноманітність інших різновидів багатомодових волокон, що відрізняються тими чи іншими параметрами. Область застосування багатомодового волокна багато в чому визначається типом використовуваного випромінювача і робочою довжиною хвилі. Для передачі по багатомодовому волокну найчастіше використовуються випромінювачі трьох типів:

Світлодіоди (850/1300 нм). Через велику розбіжність випромінювання і ширини спектра світлодіоди можуть використовуватися для передачі на короткі дистанції і на маленькій швидкості. При цьому лінії на основі світлодіодів відрізняються невисокою вартістю через низьку ціну самих світлодіодів і можливості використання більш дешевих волокон OM1 і OM2.

Лазери з резонатором Фабрі-Перо. Оскільки лазери FP (Fabry-Perot) мають досить велику ширину спектра, вони використовуються в основному з багатомодовим волокном.

Лазери VCSEL (850 нм). Особлива конструкція вертикально-випромінюючих лазерів (VCSEL - vertical-cavity surface-emitting laser) сприяє здешевленню процесу їх виробництва.

### 1.3 Одномодові волокна

Всі основні типи одномодових оптичних волокон (ООВ), їх параметри та характеристики описані в двох групах стандартів. По-перше, в стандартах Міжнародної Електротехнічної Комісії (IEC), а також у Рекомендаціях Сектора Стандартизації Телекомунікацій Міжнародного Союзу Електрозв'язку (ITU-T) серії G.65x. В документах ITU-T простежується ставлення до ООВ, як до напрямної системи для передачі інформації. Кожна Рекомендація описує певний тип ООВ, фізичний зміст його параметрів і технічні вимоги до них, з урахуванням поділу на окремі види (табл.1.3.1).

Таблиця.1.3.1 Основні ти ООВ

G.652	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю
G.653	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю зі зміщеною дисперсією
G.654	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю зі зміщеною довжиною хвилі відсічення
G.655	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю з ненульовою зміщеною дисперсією
G.656	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю з ненульовою дисперсією для широкосмугових транспортних мереж
G.657	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю, що не чутливий до втрат на макрозгинах, для використання в мережах доступу

Розглянемо всі стандартизовані типи та види ООВ, та проведемо порівняльний аналіз характеристик, та розглянемо питання оптимального вибору волокна для конкретного застосування, також для всіх типів ООВ наводяться спектральні характеристики основних параметрів: коефіцієнта загасання, коефіцієнта хроматичної дисперсії. В (табл.1.3.2) наведено діапазони, які використовуються для передачі сигналів по одномодовим оптичним волокнам відповідно до Рекомендацій ITU-T серії G.

Таблиця 1.3.2 Діапазони оптичного зв'язку.

O	1260 ... 1360 нм	Основний (Original)
E	1360 ... 1460 нм	Розширений (Extended)
S	1460 ... 1530 нм	Короткохвильовий (Short wavelength)
C	1530 ... 1565 нм	Стандартний (Conventional)
L	1565 ... 1625 нм	Довгохвильовий (Long wavelegth)
U	1625 ... 1675 нм	Наддовгохвильовий (Ultra-long wavelength)



## 1.4 Основні типи волокон типу G.65x

### 1.4.1 Волокна G.652

Стандартні одномодові волокна зі східчастим профілем показника заломлення з'явилися на ринку телекомунікацій на початку 1980-х років, як реальна альтернатива багатомодовим. Конструктивне зменшення діаметра серцевини з 50 мкм до 8-10 мкм при передачі на довжинах хвиль 1310 нм і вище, дозволяло забезпечити одномодовий режим передачі.

Останнім часом одномодові волокна стали використовуватися на довжині хвилі 1550 нм для організації систем зі спектральним ущільненням (WDM) при невеликій кількості несучих. Розвиток таких систем змусив задуматися про можливості використання діапазону E (1360-1460 нм). В результаті після вдосконалення технології дегідратації з'явилися одномодові волокна з так званим “згладженим водним піком” (LWP, Low Water Peak) (пунктирна лінія на рис. 1). Досить вдалим моментом є те, що для ООВ цього типу довжина хвилі відсічення (пунктирна лінія  $\lambda_c$  на рис. 1.4.1.) знаходиться поруч з основною робочою довжиною хвилі 1310 нм.

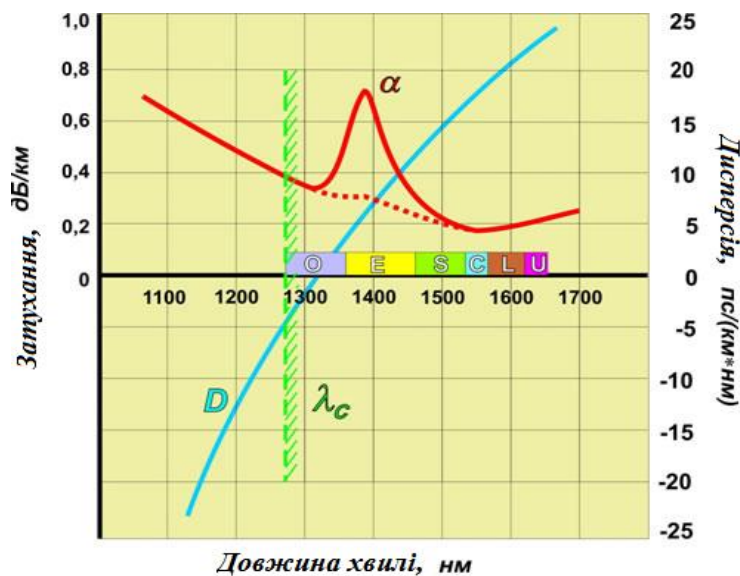


Рисунок 1.4.1 Спектральні залежності коефіцієнта загасання і коефіцієнта хроматичної дисперсії ООВ типу G.652.

Остання редакція Рекомендації G.652 містить параметри і характеристики чотирьох типів одномодових ОВ, які відрізняються за властивостями і, відповідно, за призначенням (табл. 1.4.1).

Таблиця 1.4.1. Параметри (характеристики) ООВ типу G.652.

Параметр (характеристика)	Тип волокна, відповідно до Рекомендацій ITU-T			
	G.652A	G.652B	G.652C	G.652D
Діаметр модової плями, нм (на довжині хвилі 1310 нм)	8,6 ... 9,5 ± 0,6	8,6 ... 9,5 ± 0,6	8,6 ... 9,5 ± 0,6	8,6 ... 9,5 ± 0,6
Діаметр оболонки, мкм	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
Максимальна довжина хвилі зрізу ОВ в кабелі, мкм	1260	1260	1260	1260
Максимальні втрати на макрозгині (100 витків радіусом 30 мм), дБ, на довжині хвилі: 1550 нм; 1625 нм;	0,1 -	- 0,1	- 0,1	- 0,1
Довжина хвилі нульової дисперсії, мкм	1300-1324	1300-1324	1300- 1324	1300- 1324
Нахил хроматичної дисперсії поблизу нульового значення, пс/(нм <sup>2</sup> × км)	0,092	0,092	0,092	0,092
Макс. коефіцієнт PMD, пс/км <sup>1/2</sup>	0,50	0,20	0,50	0,20

Стандартні одномодові волокна (G.652) застосовуються на мережах зв'язку самих різних типів через свою технологічність, невисоку вартість,

придатність для роботи у всіх спектральних діапазонах, як з системами спектрального ущільнення, так і без них.

#### 1.4.2 Волокна G.653

Практика використання ОК з одномодовими волокнами в 1980-х роках показала неоптимальність роботи в другому (1310 нм) і третьому (1550 нм) вікні прозорості. На довжині хвилі 1310 нм ООВ мали мінімальну дисперсію, а отже і максимальну пропускну здатність, в той час як на довжині хвилі 1550 нм - мінімальний коефіцієнт загасання, а отже, максимальну довжину регенераційної ділянки ВОЛЗ. Тому були розроблені волокна з більш складними профілями показника заломлення (трикутний, трапецієподібний т.ін.), що дозволяють змістити спектральну характеристику дисперсії таким чином, щоб її мінімальне значення знаходилося в діапазоні 1550 нм. Використовуючи такі ООВ «зі зміщеною дисперсією» (DSF), можна було забезпечити максимальну широкосмуговість і дальність зв'язку в одному вікні прозорості. Незважаючи на свою високу вартість, вони продовжують залишатися хорошим засобом побудови ділянок мереж великої дальності для передачі великих обсягів інформації. Остання версія Рекомендації G.653 розглядає два види одномодових ОВ цього типу (табл. 1.4.2.1). Пізніша розробка G.653B, зокрема, містить не просто фіксоване значення коефіцієнта хроматичної дисперсії, а дві обмежуючі криві (рис. 1.4.2.1).

Таблиця 1.4.2.1 Параметри ООВ типу G.653

Параметр (характеристика)	Тип волокна, відповідно до Рекомендацій ITU-T	
	G.653A	G.653B
Діаметр оболонки, мкм	125 ± 1	125 ± 1
Максимальна довжина хвилі зрізу ОВ в кабелі, мкм	1270	1270

## Продовження таблиці 1.4.2.1

Максимальні втрати на макрозгині (100 витків радіусом 30 мм), дБ, на довжині хвилі 1550 нм	0,5	0,1
Довжина хвилі нульової дисперсії, мкм	1500 - 1600	-
Максимальний коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм × км), в діапазоні довжин хвиль 1525-1575 нм 1460-1525 нм 1525-1625 нм 1460-1575 нм 1575-1625 нм	3,5	- 9 ... - 3,5 -3,5 ... + 1,7 -1,9 ... + 3,5 +3,5 ... + 7,8
Максимальний коефіцієнт PMD, пс/км	0,50	0,20

Волокна G.653A зазвичай знаходять своє застосування на транспортних мережах зв'язку на ділянках з великою протяжністю для підтримки систем передачі SDH до STM-64 і STM-256 для внутрішньостанційних з'єднань. Волокна G.653B аналогічні G.652A, однак, за рахунок зменшеної поляризаційної дисперсії, можуть застосовуватися і для систем STM-256 (40 Гбіт/с) для ВОЛЗ протяжністю більше 400 км.

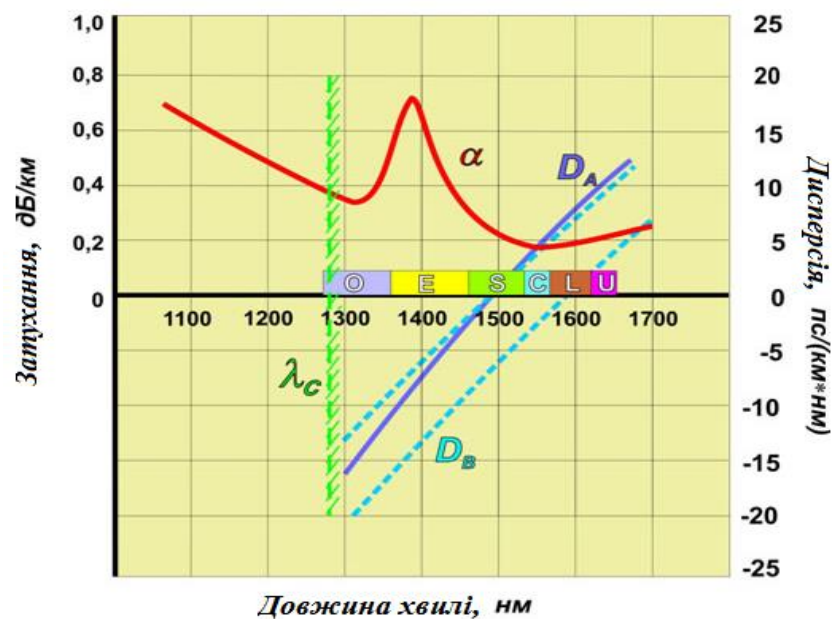


Рисунок 1.4.2.1 Спектральні залежності коефіцієнта загасання і коефіцієнта хроматичної дисперсії ООВ типу G.653

### 1.4.3 Волокно G.654

Поява цього типу волокон зв'язна з прокладкою перших морських і трансокеанських ВОЛЗ в середині 1980-х років. У таких лініях вимагалось, в першу чергу, забезпечити дуже великі довжини регенераційних ділянок, тобто мінімізувати коефіцієнт загасання. Для цього в якості серцевини використовується не легований оксидом германію кварц, а чистий кварц. Необхідна різниця показників заломлення серцевини і оболонки забезпечувалася додаванням фтору в кварцовий матеріал оболонки ООВ. Ще однією особливістю волокон G.654 є зміщення довжини хвилі відсічення, ближче до несучої 1550 нм, а саме - 1530 нм. Це забезпечує більш сприятливий електродинамічний режим, при якому найбільша частина переданої енергії зосереджується в надчистій кварцовій серцевині.

В даний час такі ООВ досить активно використовуються в океанських і морських ВОЛЗ, як з оптичними підсилювачами і регенераторами, так і без них, як з системами WDM, так і без них. Можливо, в перспективі для розширення можливостей WDM з волокнами цього типу буде задіяний діапазон U. Остання редакція Рекомендації G.654 містить параметри і характеристики трьох різних типів одномодових ОВ (табл. 4).

Таблиця 1.4.3.1 Параметри (характеристики) ООВ типу G.654

Параметр (характеристика)	Тип волокна, відповідно до Рекомендацій ITU-T		
	G.654A	G.654B	G.654C
Діаметр модової плями, нм (на довжині хвилі 1310 нм)	9,5 ... 10,5 $\pm 0,7$	9,5 ... 13,0 $\pm 0,7$	9,5 ... 10,5 $\pm 0,7$
Діаметр оболонки, мкм	$125 \pm 1$	$125 \pm 1$	$125 \pm 1$
Максимальна довжина хвилі зрізу ОВ в кабелі, мкм	1530	1530	1530
Максимальні втрати на макрозгині (100 витків радіусом 30 мм), дБ, на довжині хвилі 1625 нм	0,5	0,5	0,5

## Продовження таблиці 1.4.3.1

Мінімальне перевірочне навантаження на розрив, ГПа	0,69	0,69	0,69
Максимальний коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм × км), в діапазоні довжин хвиль 1550 нм	20	22	20
Нахил хроматичної дисперсії поблизу нульового значення, пс/(нм <sup>2</sup> × км)	0,07	0,07	0,07
Максимальний коефіцієнт загасання, дБ/км, в діапазоні довжин хвиль 1550 нм	0,22	0,22	0,22
Максимальний коефіцієнт PMD, пс/Öкм	0,50	0,20	0,20

Сучасні одномодові ОВ зі зміщеною довжиною хвилі відсічення зазвичай мають на довжині хвилі 1550 нм коефіцієнт хроматичної дисперсії порядку 18-20 пс/(нм · км) і коефіцієнт загасання 0,16 ... 0,18 дБ/км. З початком впровадження систем зі спектральним ущільненням, виявилось, що волокна G.654 досить добре дозволяють модернізувати системи з однією несучою до систем з WDM, оскільки мають в діапазоні 1550 нм досить велику дисперсію.

Волокна G.654A знаходять застосування, в першу чергу, в підводних ОК для передачі по морським і трансокеанським лініям потоків до STM-16 (2,5 Гбіт/с) або до STM-64 (10 Гбіт/с) з обмеженням довжини по хроматичній дисперсії.

Волокна G.654B мають такі ж параметри, а відповідно і можливості застосування, як і G.654A. Крім того, більш жорсткі вимоги до поляризаційної дисперсії дозволяють використовувати ці волокна для передачі потоків до STM-64 (10 Гбіт/с) або STM-256 (40 Гбіт/с).

Волокна G.654C аналогічні G.654A, однак більш жорсткі вимоги до поляризаційної дисперсії дозволяють використовувати їх для передачі потоків з більшою швидкістю (до 40 Гбіт/с) і на великі відстані, за умови компенсації хроматичної дисперсії.

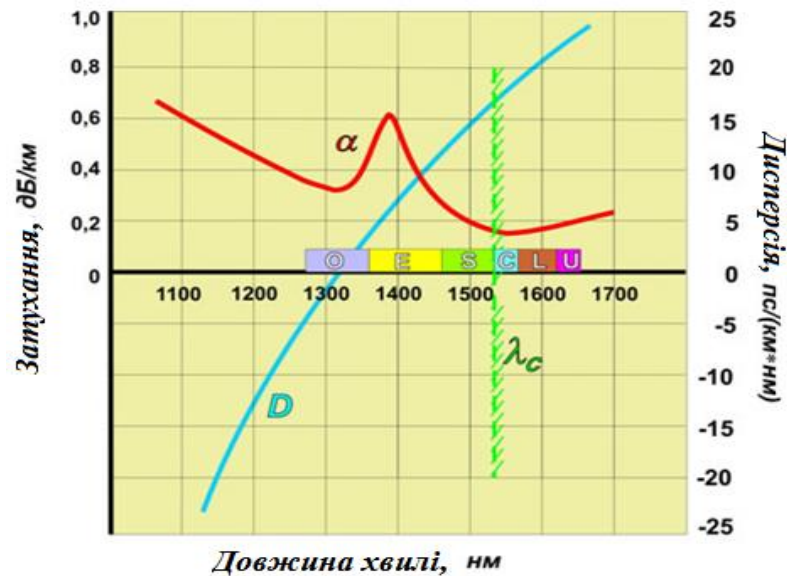


Рисунок 1.4.3.1 Спектральні залежності коефіцієнта загасання і коефіцієнта хроматичної дисперсії ООВ типу G.654.

#### 1.4.4 Волокна G.655

Поява цього специфічного типу одномодових волокон в 1990-х роках безпосередньо пов'язана з розвитком систем спектрального мультиплексування. Використання декількох несучих і відповідно, збільшення щільності потужності в серцевині волокна призвело до прояву при передачі декількох нелінійних ефектів. Найбільше їх вплив виникає в ООВ при значеннях дисперсії, близьких до нуля. Тому були розроблені оптичні волокна, оптимізовані для роботи у ВП 1550 нм в системах з WDM. На цій довжині хвилі такі волокна мають невелику, але відмінну від нуля хроматичну дисперсію. Причому знак коефіцієнта хроматичної дисперсії не має особливого значення.

Реалізувати конструкцію такого волокна - завдання досить непросте. Використовуються складні профілі показника заломлення. Зараз лише декілька провідних виробників у світі стабільно випускають волокна з ненульовою зміщеною дисперсією (NZDSF). Відповідно високою залишається і їх вартість. Однак можливість організації роботи декількох

несучих по одному ООВ досить швидко окупає такі витрати. Рекомендації G.655 визначає ще два види волокон - G.655D і G.655E, які мають стандартну хроматичну дисперсію також в діапазонах S і L (табл. 1.4.4.1). В останнє десятиліття даний тип ООВ дуже активно використовується у ВОСП при побудові транспортних мереж різних рівнів з використанням систем спектрального ущільнення. Волокна з ненульовою зміщеною дисперсією найкраще підходять для роботи систем щільного хвильового мультиплексування (DWDM) в діапазоні C (1530-1565 нм) з оптичними підсилювачами. Можливе збільшення числа несучих DWDM за рахунок діапазонів S і L. Також можлива робота систем хвильового мультиплексування (CWDM) у всьому діапазоні 1460-1625 нм. Практично всі нові кабельні лінії мають у своєму складі хоча б кілька волокон типу G.655 для майбутнього розвитку. Сучасні одномодові ОВ мають зазвичай в діапазоні C позитивний або негативний коефіцієнт хроматичної дисперсії порядку 1 ... 10 пс/(нм · км), а також коефіцієнт загасання порядку 0,2 ... 0,25 дБ/км (на 1550 нм).

Таблиця 1.4.4.1 Параметри (характеристики) ООВ типу G.655.

Параметр (характеристика)	Тип волокна, відповідно до Рекомендацій ITU-T				
	G.655A	G.655B	G.655C	G.655D	G.655E
Діаметр модової плями, нм (на довжині хвилі 1310 нм)	8,0 ... 11,0 ± 0,7	8,0 ... 11,0 ± 0,7	8,0 ... 11,0 ± 0,7	8,0 ... 11,0 ± 0,6	8,0 ... 11,0 ± 0,6
Діаметр оболонки, мкм	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
Максимальний ексцентриситет серцевини/оболонки, мкм	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
Максимальна довжина хвилі зрізу ОВ в кабелі, мкм	1450	1450	1450	1450	1450



## Продовження таблиці 1.4.4.1

Максимальні втрати на макрозгині (100 витків радіусом 30 мм), дБ, на довжині хвилі 1625 нм	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Максимальний коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм × км), в діапазоні довжин хвиль - 1530-1565 нм; - 1460-1550 нм; - 1550-1625 нм	+/- (0,1 ... 6)	+/- (1 ... 10) Dmax - Dmin ≤ 5	+/- (1 ... 10) Dmax - Dmin ≤ 5	-4,2...+6,2 +2,8...+11,3	+0,2...+ 5,8 +4,7...+13,4
Максимальний коефіцієнт загасання, дБ/км, в діапазоні довжин хвиль:  1550 нм; 1625 нм	0,35 0,4	0,35 0,4	0,35 0,4	0,35 0,4	0,35 0,4
Максимальний коефіцієнт PMD, пс/км <sup>1/2</sup>	0,20	0,50	0,20	0,20	0,20

Волокна G.655A рекомендується застосовувати на транспортних мережах зв'язку в системах з WDM STM-64 (10 Гбіт/с) і STM-256 (40 Гбіт/с) при обмеженій введеній потужності (невеликому числі несучих) і канальному інтервалі 200 ГГц в діапазоні довжин хвиль 1530-1564 нм .

Волокна G.655B також можуть застосовуватися на транспортних мережах зв'язку в системах з WDM. Але через більш високу поляризаційну дисперсію граничним вважається їх використання для передачі потоків

STM-64 (10 Гбіт/с) на відстань до 400 км. При цьому допускається більша потужність, ніж для G.655A, і більш щільне розташування несучих (в діапазоні довжин хвиль 1530-1564 нм (C - діапазон).

Волокна G.655C аналогічні G.655B, однак, за рахунок зменшеної поляризаційної дисперсії можуть застосовуватися для передачі потоків STM-64 (10 Гбіт/с) на відстань більше 400 км і для роботи STM-256 (40 Гбіт/с).

Волокна G.655D також можуть застосовуватися на транспортних мережах зв'язку в системах з WDM в додаток до зазначених волокон G.655C, але в розширеному діапазоні довжин хвиль 1460-1625 нм (S-C-L). Крім того, можлива робота систем CWDM на несучих від 1471 нм і вище.

Волокна G.655E призначені для застосування аналогічно до G.655D, більш високі значення коефіцієнта хроматичної дисперсії дозволяють їх використовувати в системах DWDM з найменшим рознесенням каналів.

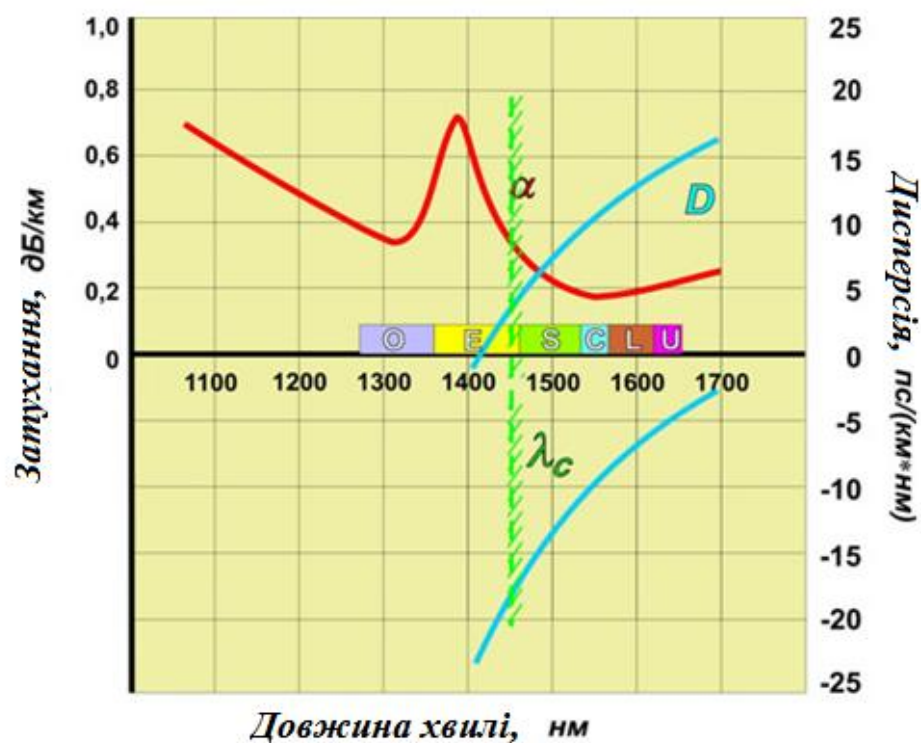


Рисунок 1.4.4.1 Спектральні залежності коефіцієнта загасання і коефіцієнта хроматичної дисперсії OOB типу G.655

### 1.4.5 Волокна G.656

Тривало вдосконалення систем спектрального мультиплексування, особливо щільного DWDM, а роботи з нарощування каналів тривали в двох напрямках. По-перше, за рахунок розширення використаного спектрального діапазону, хоча цьому перешкоджала нерівномірність коефіцієнта загасання і коефіцієнта хроматичної дисперсії на різних довжинах хвиль. А по-друге, за рахунок більш щільного розташування оптичних несучих (звуження каналного інтервалу). Цьому перешкоджала недосконалість активних (лазерів) і пасивних (фільтрів, мультиплексорів/демультиплексорів) компонентів. Проте постійний прогрес технологій зумовив необхідність розробки одномодових волокон, максимально оптимізованих саме для робіт систем DWDM з найменшими каналними інтервалами (100 ГГц і менше). Такі OOB були створені і вперше стандартизовані ITU-T в 2004 р. на основі схожих за параметрами волокон G.655E. Їх відрізняв дещо менший діаметр модового поля, більше позитивне значення коефіцієнта хроматичної дисперсії на довжині хвилі 1550 нм і специфікація не тільки дисперсії, але і коефіцієнта загасання в розширеному діапазоні довжин хвиль 1460-1625 нм (S-C-L).

Незважаючи на відносну складність технології і відповідно, немалу вартість, волокна з ненульовою дисперсією для широкосмугових транспортних мереж (NZDSF-WTN) знаходять своє застосування на транспортних мережах різного призначення і протяжності. У значній частині спектра специфіковані основні характеристики, які дозволяють застосовувати їх як в CWDM, так і в DWDM, тобто нарощувати пропускну здатність мережі за потребою. Імовірна подальша модифікація волокон цього типу за рахунок появи додаткових видів, можливо, з розширенням в діапазон E. Сучасні OOB G.656 мають зазвичай в розширеному діапазоні S-C-L позитивний коефіцієнт хроматичної дисперсії порядку 1 ... 14 пс/(нм · км), а також коефіцієнт загасання порядку 0,2 ... 0,25 дБ/км

(діапазон C) і 0,25 ... 0,3 дБ/км Остання редакція Рекомендації G.656 містить всього одну модифікацію цього типу ООВ (табл. 1.4.5.1).

Таблиця 1.4.5.1. Параметри ООВ типу G.656.

Параметр (характеристика)	Тип волокна, відповідно до Рекомендацій ITU-T G.656
Діаметр модової плями, нм (на довжині хвилі 1310 нм)	7,0 ... 11,0 ± 0,7
Діаметр оболонки, мкм	125 ± 1
Максимальний ексцентриситет серцевини/оболонки, мкм	0,8
Максимальна некруглість оболонки, %	2,0
Максимальна довжина хвилі зрізу ОВ в кабелі, мкм	1450
Максимальні втрати на макрозгині (100 витків радіусом 30 мм), дБ, на довжині хвилі 1625 нм	0,5
Мінімальне перевірочне навантаження на розрив, Гпа	0,69

#### 1.4.6 Волокна G.657

Після появи перших розробок в 2006 р ITU-T вперше стандартизував ООВ, малочутливе до втрат на макрозагибах, спеціально для використання в мережах доступу. Рекомендація G.657 містить параметри і характеристики двох типів ООВ, кілька відрізняються за властивостями (табл. 1.4.6.1). Однак технологія виробництва таких ООВ досить складна. У цьому випадку створюються волокна зі зменшеним діаметром або підвищеним показником заломлення серцевини. Випускаються також волокна з сильно зниженим показником заломлення оболонки за рахунок легування фтором. В обох

випадках створюються умови для зосередження поля моди в серцевині ООВ навіть при вигинах.

Таблиця 1.4.6.1 Параметри і характеристики G.657

Параметр (характеристика)	Тип волокна, відповідно до Рекомендацій ITU-T	
	6.657A	G.657B
Діаметр оболонки, мкм	$125 \pm 0,7$	$125 \pm 0,7$
Діаметр модової плями, нм (на довжині хвилі 1550 нм)	$8,6 \dots 9,5 \pm 0,4$	$6,3 \dots 9,5 \pm 0,4$
Максимальний ексцентриситет серцевини/оболонки, мкм	0,5	0,5
Максимальна некруглість оболонки, %	1,0	1,0
Максимальна довжина хвилі зрізу ОВ в кабелі, мкм	1260	1260
Максимальні втрати на макрозгині (10 витків радіусом 15мм),дБ, на довжині хвилі :		
1550 нм	0,25	0,03
1625 нм	1,0	0,1
1 виток радіусом 10 мм на довжині хвилі :		
1550 нм	0,75	0,1
1625 нм	1,5	0,2
1 виток радіусом 10 мм на довжині хвилі :		
1550 нм	-	0,5
1625 нм	-	1,0
Мінімальне перевірочне навантаження на розрив, Гпа	0,69	0,69

## Продовження таблиці 1.4.6.1

Довжина хвилі нульової дисперсії, мкм	1300 - 1324	1300 - 1420
Максимальний коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм × км), в діапазоні довжин хвиль		
1310нм	-	0,5
1300...1625нм	0,4	-
1383нм	0,4	-
1550нм	0,3	0,3
1625нм	-	0,4
Максимальний коефіцієнт PMD, пс/Öкм	0,20	-

Вид G.657A забезпечує мінімальний радіус вигину 10 мм. Інші його параметри в значній мірі нагадують тип G.652D зі згладженим водним піком (рис.1.4.6.1). Це дає можливість, зокрема, зменшити втрати при з'єднанні волокон типів G.657 і G.652.

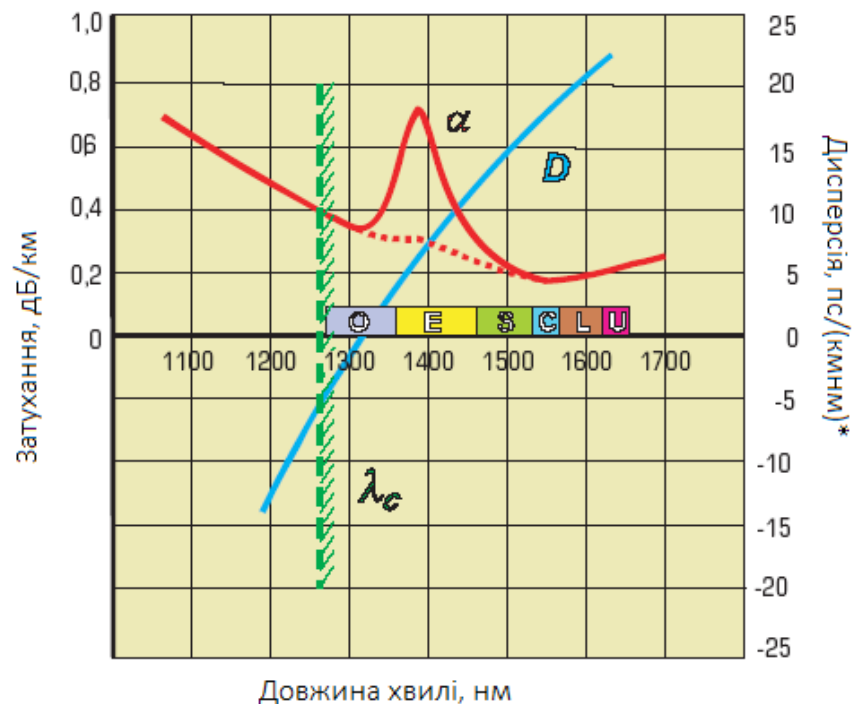


Рисунок 1.4.6.1. Спектральна залежність коефіцієнту затухання і коефіцієнта хроматичної дисперсії ООВ типу G.657

Однак технологія виробництва таких ООВ досить складна. У цьому випадку створюються волокна зі зменшеним діаметром або підвищеним показником заломлення серцевини. Випускаються також волокна з сильно зниженим показником заломлення оболонки за рахунок легування фтором. В обох випадках створюються умови для зосередження поля моди в серцевині ООВ навіть при вигинах. Зараз тривають роботи по створенню принципово нових конструкцій, що поєднують малі втрати на вигинах і сумісність з традиційними видами одномодових волокон.

*Волокна G.657A* призначені для використання з різними додатками на мережах доступу. Вони оптимізовані по втратах на макровигинах, а значення інших параметрів залишаються в діапазоні, рекомендованому для G.652D.

*Волокна G.657B* мають параметри, необхідні для установки оптимізованої мережі доступу з дуже малими радіусами вигину, застосовуваними в різних кросових і розподільних пристроях, а також при прокладці в межах приміщень. У той же час, значення діаметра модового плями і коефіцієнта хроматичної дисперсії можуть перевищувати значення, рекомендовані для G.652D.

Розглянуті вище ООВ практично при будь-якій постановці завдання зможуть забезпечити техніко-економічну ефективність проекту, якщо правильно вибрати їх тип і вид. Причому, крім основних параметрів передачі ООВ, коефіцієнта загасання і коефіцієнта хроматичної дисперсії, останнім часом вирішальну роль стали грати коефіцієнт поляризаційної дисперсії, втрати на вигинах і геометричні параметри, що визначають втрати при монтажі. Це обумовлено все більш специфічними, конкретними умовами застосування оптичних кабелів.

## 1.5 Напрямки вдосконалення та подальший розвиток ВОСП

Розглянемо перспективні напрямки розвитку оптичних волокон. Зростання рівня передавання потужності в ОВ, зростання швидкості

передавання по ВОСП (в найближчій перспективі до 50-100Тбіт/с і більше) за рахунок збільшення кількості спектральних каналів в діапазоні довжин хвиль від 1300 нм до 1610 нм, потребує створення нового покоління ОВ. Такі ОВ мають мати великі діаметри сердцевини для одномодового режиму, або матеріал сердцевини має мати низький рівень нелінійності. Для вирішення цих проблем було розроблено низку оптичних волокон, таких як мікроструктуроване волокно, волокно на основі фотонних кристалів Photonic Crystal Fibers (PCF) тощо. Типи порожнистих волокон(рис.1.5.1):

а) одномодове порожнисте волокно, де циліндричні повітряні порожнини розміщуються гексагонально симетрично, а центральна повітряна порожнина відсутня;

б) багатомодове волокно в якому в якості зовнішнього шару використовується кільце з повітряних порожнин;

в) активне волокно створено з використанням легованого скла (зовнішній шар з повітряних порожнин дозволяє отримати волоконний лазер);

г) порожнисте волокно з фотонним кристалом з забороненою зоною.

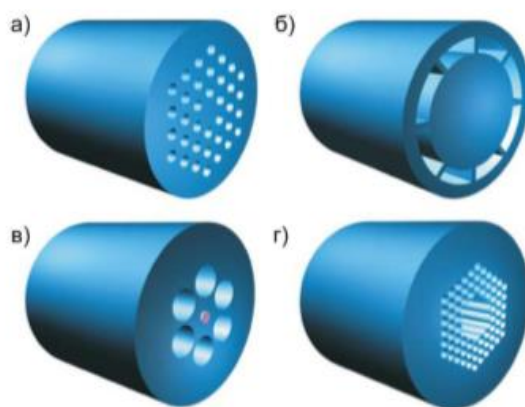


Рисунок 1.5.1 Типи порожнистих волокон

На відміну від звичайного ОВ мікроструктуроване оптоволокно виготовляється цілком з однорідного скла. При цьому зовнішній шар з більш низьким показником заломлення замінений на велику кількість циліндричних порожнин, заповнених певним газом або просто повітрям. Технологія



виробництва таких волокон була вперше запропонована в 1991 р. Технології досить проста: скляні капіляри відносно великого розміру складаються разом в бажану структуру, яка надалі витягується у оптичне волокно. Геометрія розташування повітряних порожнин визначається початковим розташуванням капілярів. Залежно від того як реалізований механізм повного внутрішнього відбиття. Такі волокна можна розділити на два типи: порожнинні волокна і волокна на фотонних кристалах. В порожнинних волокнах скляна центральна частина оточена набором циліндричних повітряних порожнин. Вони в свою чергу знижують ефективний показник заломлення, тим самим забезпечуючи ефект повного внутрішнього відбиття.

Оскільки розмір повітряних порожнин і відстань між ними у порівнянні з довжиною оптичної хвилі (сотні нанометрів), то й ефективний показник заломлення варіюватиметься в залежності від робочої довжини хвилі. Результатом цього є здатність такого волокна підтримувати одномодовий режим незалежно від довжини хвилі. Такі волокна зазвичай використовуються для передачі високих потужностей світла і володіють низькою нелінійністю.

В оптичному волокні з фотонним кристалом локалізація світла в центрі волокна відбувається за рахунок явища інтерференції на періодичній структурі розміром порівняним з довжиною оптичної хвилі, створеної ґратами циліндричних порожнин - фотонним кристалом. Ідея фотонного кристалу полягає в тому, що в періодичній структурі промені світла, відбиті від областей з різним показником заломлення, інтерферують один з одним, посилюючись або ослаблюючись. При цьому інтерференція гасить (забороняє поширення) цілого діапазону довжин хвиль (так звана “заборонена зона”). Такі заборонені моди (довжини хвиль) будуть локалізовані в центральній частині волокна на всьому його протязі. У спектральних областях, що відповідають фотонним забороненим зонам, оптична хвиля не поширюється в оболонці, а поширюється лише в серцевині оптичного волокна.

Механізми поширення оптичної хвилі в звичайних світлопроводах (повне внутрішнє відбиття) та в світлопроводах на основі фотонних кристалів показано на (рис 1.5.2).

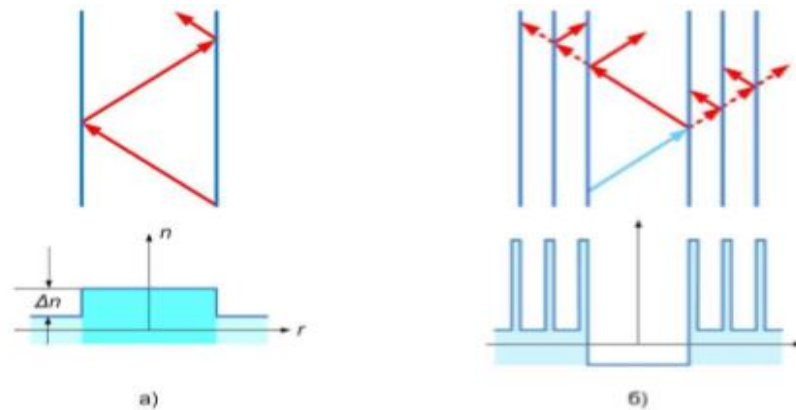


Рисунок 1.5.2 Механізм розповсюдження оптичних променів в стандартних ОВ та волокнах на основі фотонних кристалів (б)

Таким чином відпадає потреба у створенні певної різниці показників заломлення серцевини та оболонки ОВ. Більш того, досить часто використовується порожнисте волокно з фотонним кристалом, де оптична хвиля поширюється всередині повітряної порожнини в центрі волокна. Перевага таких волокон полягає в нескінченно малій дисперсії, оскільки оптична хвиля поширюється в практично бездисперсійному середовищі – повітрі (рис 1.5.3).

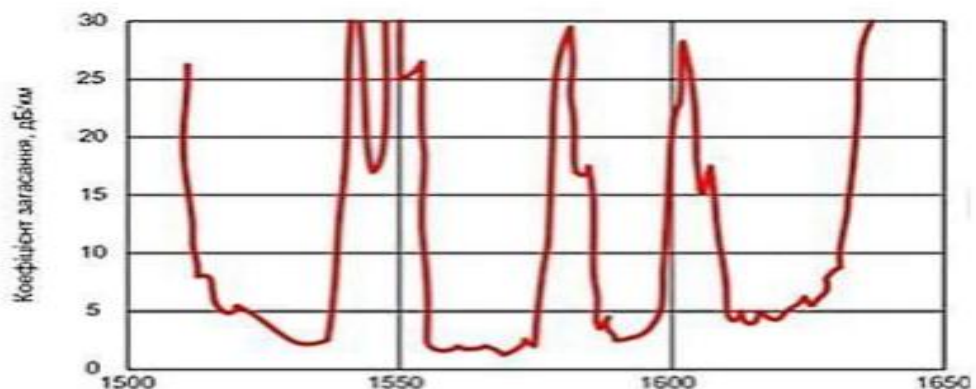


Рисунок 1.5.3 Спектральна характеристика оптичних втрат у волокнах з повітряною серцевиною

В даний час ОВ з повітряною серцевиною мають мінімальні оптичні втрати на рівні 1,7 дБ/км.

Найбільш поширеним методом виготовлення волокон на основі фотонних кристалів є виготовлення заготовки із застосуванням тонкостінних капілярів, після чого витягується волокно. Для створення волокна з порожньою серцевиною об'єднують кілька центральних капілярів, виготовлених з легко розчинного скла, після виготовлення заготовки вона промивається в кислому розчині, внаслідок чого виникає порожня серцевина.

Вперше волокно на основі фотонного кристалу було отримано у 1995 р. співробітниками фірми Blaze Photonics, (Англія). Діаметр порожнин, що проходили по всій довжині волокна складав 0,3 мкм, відстань між центрами каналів – 3 мкм. В поперечному перерізі волокно мало гексагональну форму, що визначалось структурою укладання капілярів в трубі.

Оптичне волокно, в сучасних волоконно-оптичних системах передач, використовується не лише в якості середовища розповсюдження сигналу в кабелі. Для побудови повністю оптичних мереж використовують волокна, розраховані на вирішення певних специфічних задач для різних оптичних компонентів. Такі волокна можуть мати певні властивості для вузького, специфічного застосування, наприклад підвищеної радіаційної стійкості, або застосування нових технологій для отримання нових властивостей волокон (наприклад розроблені технології побудовані на використанні наноструктур, котрі виконують роль дзеркал, в оптичному волокні, що дозволяє зберігати величину втрат у волокні за діаметра згину менше 1 см).

Для оптичних підсилювачів використовують спеціальні волокна з різноманітним легуванням (введенням заданих домішок), наприклад ербієві волокна, наприклад з наступним складом осердя волокна  $\text{Er}^{3+}\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ . Оскільки накачування відбувається на довжинах хвиль 980 нм або 1480 нм для підсилення в діапазоні окіл 1550 нм то ербієве волокно мусить забезпечувати максимальне поглинання накачки і оптимального підсилення сигналу в заданому діапазоні.

Це досягається зі створенням волокон з високою числовою апертурою (порядку  $0,33 \div 0,37$ ). Волокна для накачування волоконних лазерів мають багатомодове осердя діаметром більше 300 мкм і зовнішнім діаметром більше 350 мкм, а також більшу числову апертуру порядку 0,48 або значне загасання порядку 3 дБ/км і більше.

Для створення волоконних Брегівських решіток, котрі є головним компонентом в оптичних мультиплексорах і демультиплексорах використовують фоточутливі волокна, котрі змінюють свій показник заломлення при опроміненні ультрафіолетовим світлом, внаслідок чого сформована таким чином решітка здатна відбивати світло наперед визначених довжинах хвиль.

Брегівські волокна являють собою волокна, виконані у вигляді багат шарової оболонки, кожен шар котрої має по чергово різний високий і низький показник заломлення. Структура розраховується таким чином, що формуються фотонно-заборонені зони, під дією котрих різні моди мають різні умови розповсюдження, внаслідок чого у волокні, на певній відстані від джерела випромінювання, встановлюється одномодовий режим. Окрім оптичних волокон на основі кварцового скла, використовуються також оптичні волокна на основі других матеріалів, наприклад пластикові волокна.

Застосування пластикових оптичних волокон (polymer optical fiber - (POF)) є досить перспективним напрямком в таких будівництвах як:

- побудова локальних обчислювальних мереж;
- ділянка горизонтальної розводки структурованих кабельних систем;
- мережі що використовують концепцію FTTH. Такі волокна використовують багатомодовий режим роботи.

Експериментальні зразки полімерних волокон дозволяють передавати інформацію зі швидкістю 10 Гбіт/с на відстань більше 100 м и 40 Гбіт/с на відстань більше 30 м на довжині хвилі 1300 нм.

Апертуру порядку  $0,17 \div 0,5$ , робочу смугу від 40 МГц до більш чим 3000 МГц і показником заломлення осердя 1,49 та оболонки від 1,43 до 1,46. В дійсний час використовуються такі полімерні волокна:

- Волокно на основі poly-methyl-meth-acrylate (PMMA) (Поліметил-етанолакрилат) з теоретичним мінімумом загасання близько 150 дБ/км на довжині хвилі 650 нм;
- Градієнтне PMMA з більш широкою робочою смугою;
- Перфторполімерні волокна з теоретичним мінімумом загасання близько 10 дБ/км на довжині хвилі 1300 нм;
- Градієнтні фторполімерні волокна з теоретичним мінімумом загасання близько 1 дБ/км на довжині хвилі 1300 нм.

Волокна із полімерів використовуються також при створенні фотонних кристалів і брегівських (багатошарових) волокон.

Пластикові волокна стандартизовані стандартом IEC 60793-3-40 Optical fibres - Part 3-40: Product specification for category A4 multimode fibres, параметри яких наведені в (табл.1.5.1)

Таблиця 1.5.1 Характеристики оптичних волокон категорії A4.

Характеристики	Типи і категорії волокон A4							
	A4a	A4b	A4c	A4d	A4e	A4f	A4g	A4h
Діаметр осердя, мкм	Типове значення на $15 \div 35$ мкм менше зовнішнього діаметра				$\geq 500$	200	120	62,5
Діаметр оболонки, мкм	1000	750	500	1000	750	490	490	245
Числова апертура	0,5 (теоретично)			0,3 (теоретично)	0,25 (теоретично)	0,19 (ефективне виміряне значення)		
Робочі довжини хвиль, нм	650	650	650	650	650	650; 850; 1300	650; 850; 1300	850; 1300

В стандарті волокна поділяються на кілька типів в залежності від зовнішнього діаметру, діаметру осердя волокна, величини числової апертури,

робочої довжини. Перші п'ять категорій широко застосовуються у виготовленні сенсорів, автомобільної і цифрової аудіо промисловості.

До переваг полімерних волокон можна віднести:

- легкість монтажу;
- низька вартість і доступність джерел випромінювання;
- стійкість до згинів, у порівнянні з кварцовими волокнами;
- стійкість до радіаційного впливу;
- низька собівартість виробництва кабелю і оптичних з'єднувачів.

Основним суттєвим недоліком полімерних волокон є висока величина загасання, що зменшує сферу їх застосування.

## 1.6 Висновки по розділу 1

В двадцять першому столітті, людство звикло до високошвидкісних систем передачі, і з кожним роком, вимоги до швидкості передачі даних невблаганно зростають. На зміну металевим кабелям зв'язку, приходить оптоволокну. Адже даний тип кабелю може забезпечити високу пропускну здатність каналу, можливість мінімізувати кількість ретрансляторів, що тягне за собою зменшення внутрішніх перешкод. Забезпечить відсутність впливу електромагнітних і радіочастотних перешкод в оптичному тракті, що дає повною мірою відчутти якість, надійність а також безпеку зв'язку.

В даному розділі було здійснене загальний аналіз мереж, побудованих за допомогою волоконних кабелів зв'язку. Розглянуто види та типи оптичних кабелів. Було визначено переваги та недоліки, одномодових і многомодових волокон, раціональність їх використання в різних типах структурованих кабельних систем. Звісно що при використанні нового ОК ми покращимо технічні характеристики, з'явиться перспектива збільшення кількості оптичних каналів, збільшиться гранична швидкість передачі, а також кількість оптичних волокон відповідно, але укладання в лінію зв'язку нового оптичного кабелю, процес пов'язаний з великими капіталовкладеннями і не завжди можливий. Тому забезпечимо вирішення даного питання іншим шляхом!

## РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯННЯ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВОСП

### 2.1 Постановка проблеми та шляхи її вирішення

Постановка завдання наступна: необхідно в кілька разів підвищити пропускну спроможність магістральної ВОСП.

Розглянемо докладніше, що собою являє стандартна ВОСП. На (рис. 2.1) зображена багатоканальна ВОСП, що складається з передавальної сторони (Пер.), ОЛТ, оптичних підсилювачів (ОП) і приймальної сторони (Пр.). Оптичний лінійний тракт може містити підсилювачі і регенератори оптичного сигналу.

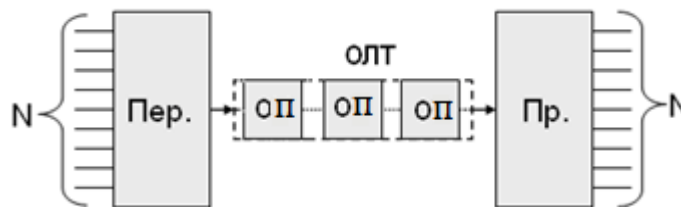


Рисунок 2.1 Структурна схема багатоканальної ВОСП.

Ресурс ОК по пропускній здатності дорівнює числу волокон помножених на число оптичних каналів і на граничну швидкість в кожному каналі при даній протяжності ділянки лінії передачі:

$$C = N_{\text{ов}} * N_{\text{опт.кан.}} * V_{\text{пред}}, \text{ де:}$$

$C$  – пропускна здатність ВОСП;

$N_{\text{ов}}$  – кількість ОВ в ОК, визначається конструкцією ОК, для максимального підвищення пропускної спроможності дана величина повинна бути великою;

$N_{\text{опт.кан.}}$  – кількість оптичних каналів - кількість оптичних несучих, що передаються за технологією WDM, на момент розгляду  $N_{\text{опт.кан.}} = 32$ , після уточнимо;

$V_{\text{пред}}$  – гранична швидкість передачі по ОВ, визначається рівнем SDH, передбачається перехід на максимальний рівень STM-256 (40 Гбіт/с).[2]

Є важлива особливість, яку необхідно відзначити, це те, що крім обліку граничної швидкості передачі, і кількості оптичних каналів, що передаються в ОВ, необхідно розібратися, скільки основних цифрових каналів (ОЦК) (64кбіт / с) можна передати по цій ВОЛЗ, і як цим числом можна варіювати, при цьому використовуючи його для інших додатків.

За допомогою даної ВОСП проводиться передача NISX каналів ОЦК. Необхідно домогтися  $N_{\text{ППС}}$  каналів - кількість каналів при підвищеній пропускної здатності, тобто:  $N_{\text{ППС}} = k * N_{\text{вих}}$ .

Виходячи з того, що вже спроектовані і введені в експлуатацію ВОСП, у яких коефіцієнт  $k$  ( $k$  - коефіцієнт збільшення пропускної спроможності, відповідно збільшення числа каналів), набуває таких значень:  $k = 2, 4, 8, 16, 32 \dots n$ , звідси випливає висновок, що  $k$  лежить приблизно в наступному інтервалі:  $1 < k < 64$ . В цьому і полягає мета різкого підвищення пропускної здатності, як зрозуміло з теми дипломного проекту, то  $k$  повинен лежати в інтервалі  $k > 100$ . При цьому виникає питання, якого порядку  $k$  необхідно задати, і якого порядку коефіцієнт  $k$  реально може вийти, наприклад: 10, 50, 100, 150 або 200.

Здавалося б все просто, але насправді це не так, питання підвищення пропускної здатності вимагає ґрунтовного розгляду, так як обсяги інформації, що передаються, неухильно зросли і продовжують зростати, що спричиняє за собою зростання коефіцієнта  $k$ .

На сьогоднішній день на головних магістралях країни стоять ВОЛЗ, що використовують стандартне оптичне волокно (G.652). На них встановлені системи з часовим ущільненням каналів (системи TDM - Time Division Multiplexing з пропускною здатністю до 2,5Гбіт/с). Збільшити пропускну здатність таких систем можна шляхом розробки і застосування нових надшвидких електронних систем модуляції, комутації та прийому лазерного випромінювання, що природно приведе до заміни кінцевого обладнання. Такі



нововведення вимагають великих матеріальних витрат для організацій, які займаються експлуатацією та переобладнанням такого роду ліній зв'язку.

Але для підвищення пропускної здатності однієї лише заміни кінцевого обладнання недостатньо, потрібна ще й установка ретрансляційних пунктів, які не потребують обслуговування (НРП) і врізка всіляких компенсаторів, а тим більше заміна кабелю, що в свою чергу не є економічно.

Розглянемо існуючі методи підвищення пропускної здатності магістральних ВОСП.

## 2.2 Методи мультиплексування цифрових потоків

Суть методу TDM: процес передачі розбивається на ряд тимчасових циклів, кожен з яких в свою чергу розбивається на  $N$  субциклів, де  $N$  - число ущільнювальних каналів. Кожен субцикл ділиться на тимчасові позиції (тайм - слоти), протягом яких передається частина інформації одного з цифрових мультиплексувальних потоків. Крім того, певна кількість позицій відводиться для ідентифікаційних синхроімпульсів, вставок і цифрового потоку службового зв'язку. При часовому мультиплексуванні кожному з інформаційних каналів системи, що мають загальну оптичну несучу (одне джерело випромінювання), відводиться певний інтервал часу або тимчасове вікно, для передачі інформації. У перший інтервал часу оптична несуча модулюється сигналом одного інформаційного каналу, у другій - іншого і т.д. Тривалість цих інтервалів залежить від багатьох факторів, головні - це швидкість перетворення електричних сигналів в оптичні і швидкість передачі інформації в лінії зв'язку.

На передавальній частині стоїть часовий мультиплексор, він встановлює черговість і часовий інтервал передачі інформації на вході лінії. На іншому кінці лінії встановлюється демультимплексор, що визначає номер каналу, ідентифікуючи його (рис. 2.2.1).

Метод TDM розділяється на два види - асинхронне (плезіохронний) і синхронне тимчасове мультиплексування. Відповідно, плезіохронна цифрова ієрархія PDH і синхронна SDH, які представлені в рекомендаціях ITU-T.

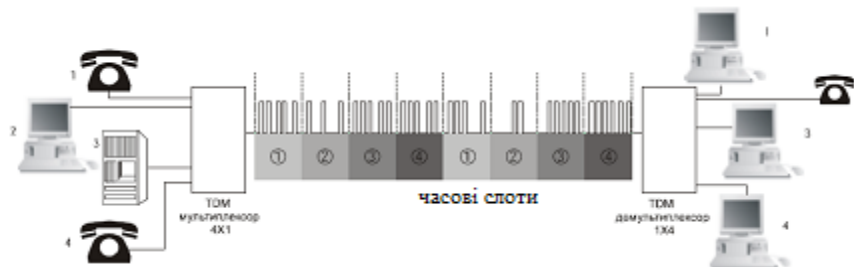


Рисунок 2.2.1 Схема передачі оптичних сигналів по ВОЛЗ з тимчасовим мультиплексуванням TDM

Структура первинної мережі розуміє об'єднання і розділення потоків переданої інформації, тому системи передачі будуються за ієрархічним принципом. Стосовно до ЦСП цей принцип полягає в тому, що кількість каналів ЦСП, відповідні даному ступеню ієрархії, більше числа каналів ЦСП попереднього ступеня в ціле число разів.

Метод WDM дозволяє збільшити швидкості передачі інформації в ВОЛЗ за рахунок одночасної передачі по одному волокну декількох TDM каналів на різних довжинах хвиль. У системах WDM до кінцевого електронного обладнання пред'являються такі ж вимоги, як і в системах TDM, для решти обладнання пропускна здатність обмежується лише самими каналами. Повна пропускна здатність лінії зв'язку не обмежена пропускною здатністю використовуваних електронних компонентів. При необхідності необхідна пропускна здатність досягається шляхом додавання або видалення оптичних несучих. Кожен канал електрозв'язку, що утворюється у ЦСП, обробляється в системі WDM, як окремий канал на окремій довжині хвилі.

Суть цього методу полягає в тому, що  $k$  інформаційних цифрових потоків, (їх кількість може бути 2, 4, 8...32), які переносяться кожен на своїй оптичній несучій довжині хвилі  $\lambda_m$  і рознесені в просторі, за допомогою спеціальних пристроїв - оптичних мультиплексорів (ОМ) - об'єднуються в один

оптичний потік  $\lambda_1.. \lambda_m$ , після чого він вводиться в оптичне волокно. На приймальній стороні проводиться зворотна операція демультимплексування (рисунок 2.2.3).

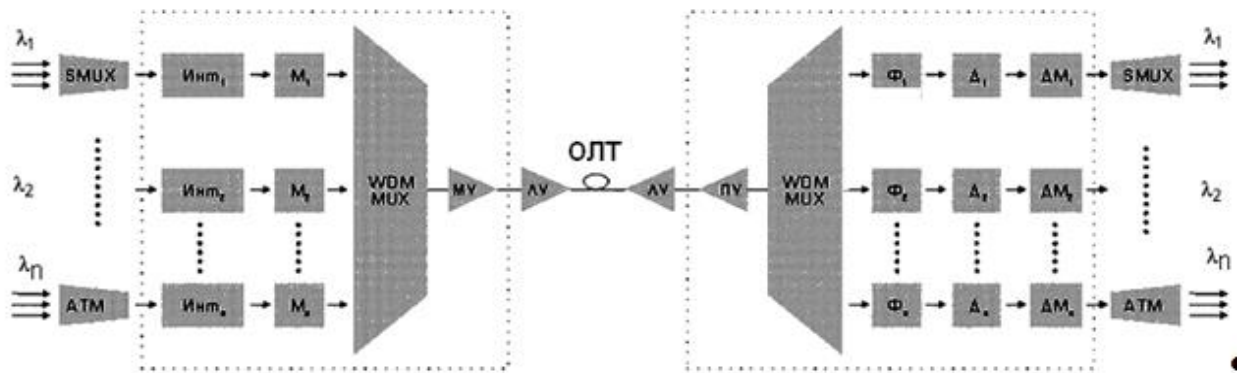


Рисунок 2.2.3 Структурна схема ВОСП зі спектральним мультиплексуванням WDM з пристроєм вводу/виводу OADM

Тут  $k$  вхідних потоків даних (кодованих цифрових імпульсних послідовностей) модулюють за допомогою оптичних модуляторів  $M_i$  оптичні несучі з довжинами хвиль  $\lambda_i$ . Модульовані несучі об'єднуються за допомогою мультиплексора Mux в агрегатний потік, який після посилення (за допомогою бустера або потужного підсилювача) подається в ОВ. На приймальному кінці потік з виходу ОВ посилюється попереднім підсилювачем, демультимплексується, тобто розділяється на модульовані несучі  $\lambda_i$ , які фіксуються за допомогою детекторів (на вході яких можуть додатково використовуватися смугові фільтри СФ для зменшення перехідних перешкод і збільшення тим самим завадостійкості детектування), і, нарешті, демодулюються демодуляторами, що формують на виході, вихідні кодовані цифрові імпульсні послідовності. Крім потужного підсилювача і проміжного підсилювача в системі можуть бути використані і лінійні підсилювачі (ЛП).

При частотному методі мультиплексування FDM кожен інформаційний потік передається по фізичному каналу на відповідній частоті - піднесучої  $f_{пн}$ .

Якщо в якості фізичного каналу виступає оптичне випромінювання - оптична несуча, то вона модулюється по інтенсивності груповим інформаційним сигналом, спектр якого складається з ряду частот піднесучих, кількість яких дорівнює кількості компонентних інформаційних потоків. Частота піднесучої кожного каналу вибирається виходячи з умови  $f_{пн} \geq 10f_{вчп}$ , де  $f_{пн}$  - частота піднесучої,  $f_{вчп}$  - верхня частота спектра інформаційного потоку. Частотний інтервал між піднесучими  $\Delta f_{пн}$  вибирається з умови  $\Delta f_{пн} \geq f_{вчп}$ .

Ущільнення потоків інформації за допомогою оптичних несучих, які мають лінійну поляризацію, називаються ущільненням по поляризації (PDM - Polarization Division Multiplexing). При цьому площа поляризації кожної несучої повинна бути розташована під своїм кутом. Мультиплексування здійснюється за допомогою спеціальних оптичних призм, наприклад, призми Рошона. Поляризаційне мультиплексування можливо тільки тоді, коли в середовищі передачі відсутня оптична анізотропія, тобто волокно не повинно мати локальних неоднорідностей і вигинів. Це одна з причин досить обмеженого застосування даного методу ущільнення. Зокрема, він застосовується в оптичних ізоляторах, а також в оптичних волоконних підсилювачах, які використовуються в пристроях накачування ербієвого волокна.

### 2.3 Порівняння методів збільшення пропускної спроможності лінійних трактів

Метою порівняння є дослідження доцільності застосування методів хвильового WDM і часового мультиплексування TDM для збільшення пропускної здатності ВОСП, що застосовують для формування лінійних трактів у одномодових оптичних волокнах.

Порівнювати такі методи, як метод частотного мультиплексування FDM і мультиплексування по поляризації PDM, немає необхідності у зв'язку з тим, що вони не знайшли застосування для телекомунікаційних транспортних систем (ТТС).

Технології хвильового мультиплексування (ХМ) і TDM передбачають об'єднання декількох вхідних “низькошвидкісних” трактів в один високошвидкісний тракт, але в ВОСП TDM – технології застосовується одна довжина хвилі ( $\lambda$ ), а в ВОСП технології ХМ – декілька центральних довжин хвиль ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ ).

У зв'язку з цією обставиною, для нарощування кількості трактів в 4 рази за технологією TDM ієрархії Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) перехід на наступний щабель ієрархії ВОСП здійснюється за принципом  $30 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4$ , що дозволяє збільшити пропускну здатність ТТС з кожною сходинкою в 4 рази, а за технологією ХМ – шляхом додавання нових оптичних несучих  $\lambda_{N+1}, \lambda_{N+2}, \dots, \lambda_{N+i}$  або шляхом зменшення розносу між центральними довжинами хвиль.

Для нарощування кількості трактів за технологією TDM ієрархії SDH необхідно збільшувати швидкість передачі STM-1 за принципом  $4 \times 4 \times 4 \times 4$  тобто в STM-256, що дозволяє отримати тракт зі швидкістю передачі 40 Гбіт/с, або STM-N в  $STM-1 \times N$ , а за технологією ХМ – шляхом додавання нових оптичних несучих  $\lambda_{N+1}, \lambda_{N+2}, \dots, \lambda_{N+i}$  або шляхом зменшення розносу між центральними довжинами хвиль.

При високій швидкості передачі ТТС значний вплив на якість передачі мають такі характеристики ОВ, як поляризаційна модова дисперсія і хроматична дисперсія. При цьому в більшій мірі зростає складність кінцевого та проміжного обладнання ТТС та в цілому значно підвищується загальна вартість проекту.

Для нарощування кількості трактів за технологією ХМ можливо використання  $k$  потоків технології TDM, що модулюються окремо в оптичні сигнали на різних довжинах хвиль оптичних трактів (ОТр). Потім ОТр об'єднуються в оптичному мультиплексорі в єдиний груповий мультиплексний сигнал виду  $\lambda_{1+2+3 \dots N}$ , який передається по лінійному тракту ТТС. В результаті пропускну здатність ВОСП збільшується в  $k$  разів.

Варто відзначити суттєвий позитивний момент – зменшення тих обмежень

по дисперсії та по іншими показниками, які були притаманні при використанні технології TDM. При цьому відзначається, що технологія ХМ може використовуватися паралельно з технологією TDM для підвищення її ефективності, залишаючи практично без змін більшу частину наявного обладнання.

Порівняльні характеристики двох методів мультиплексування наведені в таблицях 2.3.1 і 2.3.2, які пояснюють, що технологія ХМ є найбільш економічно вигідна в порівнянні з часовим методом мультиплексування.

Таблиця 2.3.1 – Технічні характеристики

Параметри	TDM – часове мультиплексування	Хвильове мультиплексування
Надійність	Висока	Висока
Пропускна спроможність	Висока	Дуже висока
Комутаційні пристрої	Складна	Складна
Загруженість ОВ	Середня	Висока
Об'єм апаратури	Великий	Середня

Таблиця 2.3.2 – Економічні характеристики

Параметри	TDM – часове мультиплексування	Хвильове мультиплексування
Вартість кінцевих пунктів	Практично однакові	
Вартість лінійного тракту	Середня	Середня
Вартість тракту	Низька	Низька
Вартість передачі інформації	Низька	Низька

Наприклад, виділення та ввід складних цифрових потоків в проміжних пунктах при часовому мультиплексуванні ієрархії PDH вимагає наявності великого обсягу обладнання, тоді як при технології ХМ для виділенні трактів

для простої мережі досить декількох пасивних елементів (мультиплексорів і демультиплексорів).

Обидві технології ХМ та TDM застосовуються для збільшення інформаційної пропускної здатності ВОСП. Хоча вони не виключають, а скоріше доповнюють одна одну, тому можна порівняти такі їх характеристики, як гнучкість структури ліній зв'язку та швидкість передачі на телекомунікаційних транспортних мережах (ТТМ).

З точки зору гнучкості структури ліній передачі, що створюють мережу зв'язку, технологія TDM дає можливість передачі по лінії зв'язку, трактів різнорідних за типом та швидкістю передачі. Системи ТТС за технологією TDM також дозволяють створювати по ОК тракти і канали, по яких з різними швидкостями передаються різні типи трафіку, шляхом застосування різних способів розподілу тайм-слотів, наприклад, IP-технології, Gigabit Ethernet, Fiber Channe, тощо. Вони можуть бути постійно закріплені за певними програмами або виділятися на вимогу за правилами DAMA (Demand Assignment Multiple Access). Можна змінювати тривалість тайм-слотів або виключити. В останньому випадку трафік передається у вигляді окремих пакетів, кожен з яких включає адресу джерела і відправника.

Незважаючи на всі ці можливості, технологія TDM працює найкраще, коли на всіх логічних трактах передається один тип трафіку, а всі тайм-слоти мають однакову тривалість і постійно закріплені за окремими трактами. Цей варіант технології TDM досить простий в реалізації і управлінні, і його експлуатаційні витрати також мінімальні.

В технології ХМ тракти повністю незалежні, трафік передається по ОTr, що створюються за принципом точка-точка. Тобто формується комбінована технологія, наприклад, IP over ХМ. На практиці на ТТМ України застосовуються відомі типи IP over ХМ – IP over DWDM та IP over HDWDM (щільне та високо щільне ХМ відповідно). Отже технології ХМ дає більшу гнучкість для структур ліній і мереж зв'язку, ніж технологія TDM.

З точки зору швидкості передачі, в технології TDM пропускна здатність

збільшується за рахунок збільшення швидкості передачі в лінійному тракті системи передачі. Тому швидкість передачі сигналів обмежується можливостями перетворення у використовуваних електронних компонентах. Отримання цифрових потоків, зберігання, передача тощо – все це вимагає застосування цифрових інтегральних схем. Вони повинні працювати зі швидкістю майже на сумарній швидкості передачі лінії зв'язку. Для кожної лінії передачі має бути встановлено обладнання, що підтримує повну пропускну здатність лінії зв'язку.

Обладнання за технологією ХМ може підтримувати тільки швидкість передачі по окремому ОTr, а не повну швидкість складеного сигналу. Таким чином, повна пропускну здатність лінії зв'язку на ОК не обмежена швидкістю роботи використовуваних електронних пристроїв. Найшвидшу лінію зв'язку TDM, яку тільки можна створити з використанням найсучаснішої техніки, в TTC ХМ на ОК можна передавати як один з багатьох трактів. Наведене порівняння показує, що технологія ХМ має незаперечну перевагу перед іншими технологіями за якими будуються телекомунікаційні транспортні системи.

#### 2.4 Структурна схема альтернативної системи мультиплексування сигналу

В результаті аналізу існуючих методів мультиплексування та частотного розділення сигналів в оптоволоконному кабелі, вдалось розробити альтернативний метод мультиплексування сигналу. Даний метод включає в себе зміни лише на рівні обладнання системи передачі інформації і дозволяє використовувати вже існуючі лінії зв'язку.

В основі методу застосовуються метод хвильового ущільнення сигналу (WDM) та часового мультиплексування (TDM).

В WDM системах кожна несуча хвиля являє собою окремий канал передачі інформації (що знижує її продуктивність в ті періоди часу, коли канал не передає жодної інформації), при TDM мультиплексуванні, кожен пакет



передається в заданий період часу (рис. 2.4.1). В нашому випадку всі хвилі запропоновано використовувати, як один канал передачі даних з використанням TDM (рис. 2.4.2). Тобто, пакетні данні користувача будуть розділені на рівні частини між каналами та передаватимуться одночасно. Цей метод надасть змогу багатократно збільшити максимальну пропускну здатність однієї лінії передачі інформації.

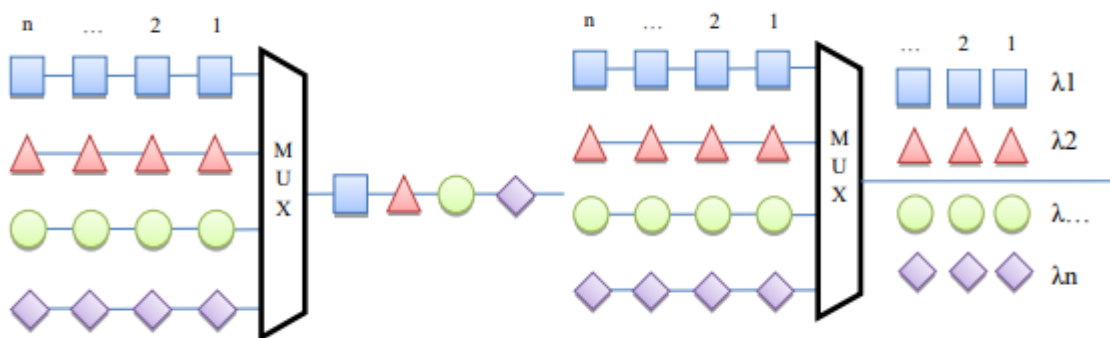


Рисунок 2.4.1 – Передача даних з використанням TDM та WDM

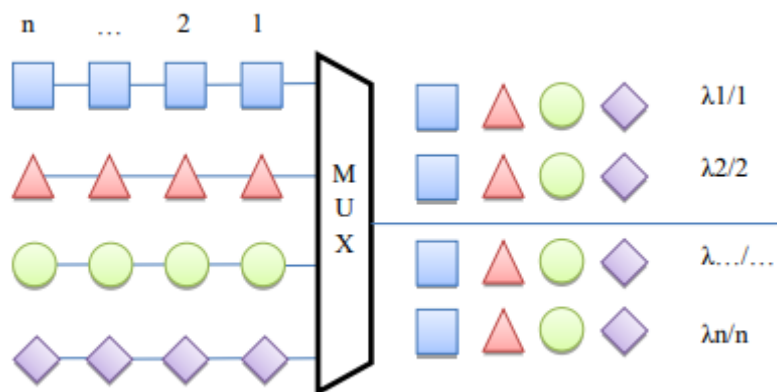


Рисунок 2.4.2 Схеми WDM

В цьому випадку кожен термінал з'єднується з лазером мультиплексора для передачі даних на своїй довжині хвилі в оптичному волокні. У нашому випадку схема матиме певні відмінності (рис. 2.4.3).

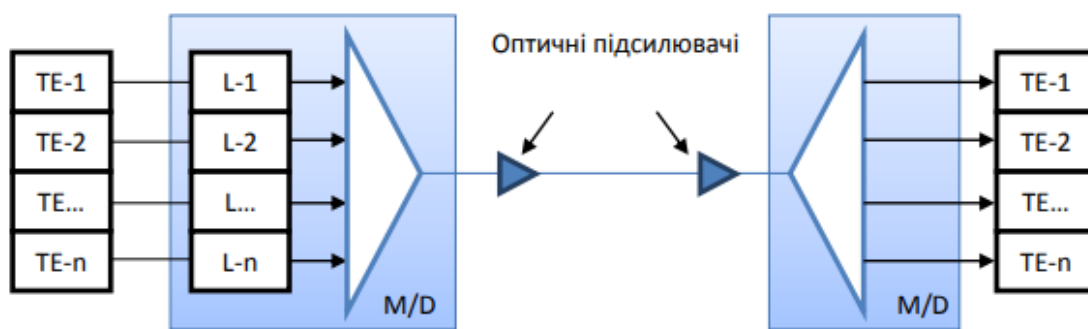


Рисунок 2.4.3 Схема запропонованої моделі мультиплексування.

Перш за все, в схему введено додатковий елемент – СМ – контрольний модуль. Саме з контрольним модулем буде з'єднуватись термінальне обладнання. Модуль повинен виконувати наступні функції:

- Реєстрацію з'єднань з терміналами;
- Формування черги;
- Прийом пакетів від відправника;
- Розподілення отриманих пакетів між лазерами;
- З'єднання отриманих від приймачів пакетів;
- Передачу пакетів одержувачу.

В процесі розподілення пакетних даних між передавачами, варто вжити заходів, що дозволитимуть вірно об'єднати розділені дані до їх початкового вигляду. Для цього варто використати метод інкапсуляції. Пакет, який буде відправлений на передавач повинен містити два додаткових поля: перше відповідатиме послідовному номеру частини, друге – на скільки частин були розділені дані. Вибір методу хвильового ущільнення, залежить від того, скільки передавачів сигналу потребує система передачі. Але оскільки кількість передавачів буде майже кратною збільшенню максимальної швидкості передачі інформації можна використовувати елементи CWDM систем – це суттєво зменшить вартість даного обладнання. Для тих, кому недостатньо пропускної здатності CWDM систем, існує два варіанти втамування «трафікового апетиту»: нарощувати кількість волокна або використовувати більш ефективну технологію ущільнення - DWDM. DWDM (англ. Dense Wavelength

Division Multiplexing - щільне хвильове мультиплексування) - технологія ущільнення інформаційних потоків, при якій кожен первинний інформаційний потік переноситься за допомогою світлових пучків на різних довжинах хвиль, а в оптичній лінії зв'язку знаходиться сумарний груповий сигнал, сформований мультиплексором з декількох інформаційних потоків .

Отже, DWDM і CWDM займаються одним і тим же – ущільненням. Відмінність в частотній сітці несучих первинних інформаційних потоків (каналів). І в діапазонах роботи самого групового сигналу. У стандарті CWDM випромінювання зручно міряти в довжинах хвиль: 1550нм, 1310нм. Зручно, в першу чергу, тому, що числа цілі. У стандартних CWDM системах відстань між двома сусідніми несучими (каналами) становить  $1610 - 1590 = 20\text{нм}$ . На сьогоднішній день CWDM системи працюють в діапазоні 1270нм-1610нм, представляючи в ньому 18 окремих каналів (1270нм, 1290нм, 1310нм ... 1590нм, 1610нм). Але в DWDM все йде трохи по-іншому. DWDM системи працюють в двох діапазонах, а саме: діапазон С (C-Band) і діапазон L (L-Band). Діапазон С знаходиться в межах від 1528.77нм до 1577.03нм (канал C01), а діапазон L знаходиться в межах від 1577.86нм (канал L100) до 1622.25нм (канал L48).

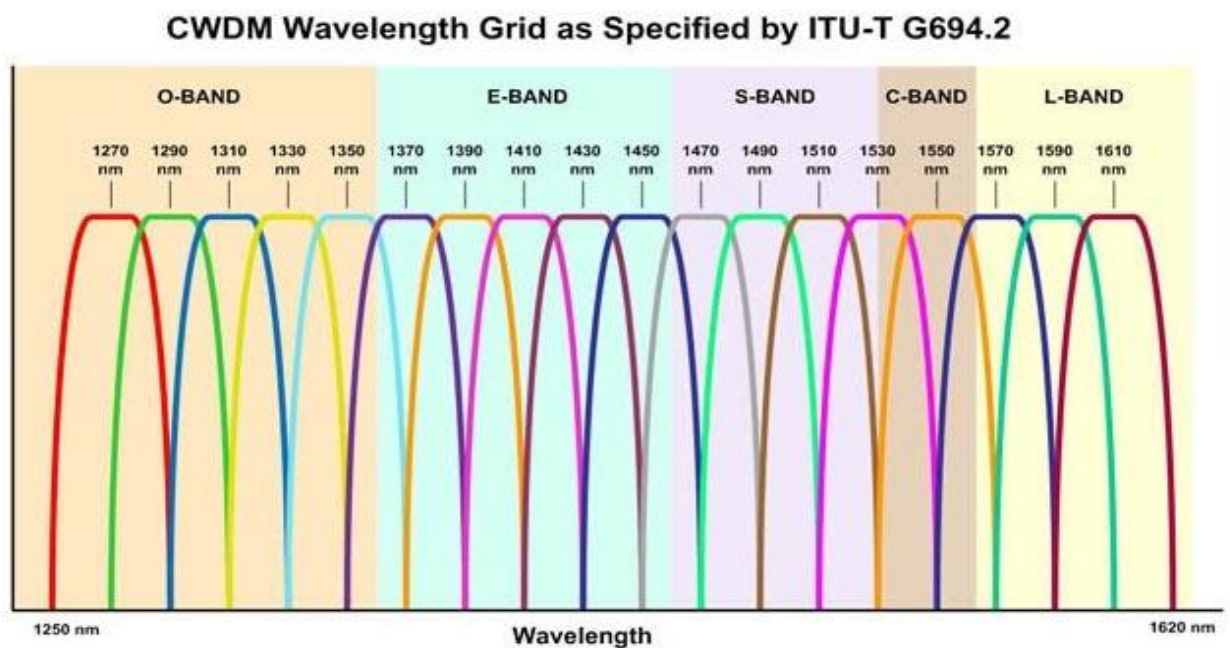


Рисунок 2.4.4 - С і L діапазони DWDM системи в загальному діапазоні CWDM-систем

Дані по частотах і довжинах хвиль представлені в (табл. 2.4.1). Саме тому в DWDM системах використовується найменування діапазону і нумерацію каналу в цьому діапазоні (наприклад, C35 або L91). Наочно всі звичайні канали DWDM системи представлені на (рис. 2.4.4).

Як ми з'ясували вище, по довжинах хвиль розрізняти DWDM канали незручно. Тому використовується розподіл по частотах - якщо уважно придивитися до (рис. 2.4.5), то видно, що різниця між двома сусідніми каналами завжди дорівнює 100ГГц. Якщо розглядати діапазон С (на даний момент освоєний більшістю виробників DWDM систем), то можна вивести сумарна кількість каналів в ньому - 61 канал.

	Frequency	$\lambda$		Frequency	$\lambda$		Frequency	$\lambda$		Frequency	$\lambda$
Code	(GHz)	(nm)	Code	(GHz)	(nm)	Code	(GHz)	(nm)	Code	(GHz)	(nm)
L66	186600	1606.60	L90	189000	1586.20	C14	191400	1566.31	C38	193800	1546.92
L67	186700	1605.74	L91	189100	1585.36	C15	191500	1565.5	C39	193900	1546.12
L68	186800	1604.88	L92	189200	1584.53	C16	191600	1564.68	C40	194000	1545.32
L69	186900	1604.03	L93	189300	1583.69	C17	191700	1563.86	C41	194100	1544.53
L70	187000	1603.17	L94	189400	1582.85	C18	191800	1563.05	C42	194200	1543.73
L71	187100	1602.31	L95	189500	1582.02	C19	191900	1562.23	C43	194300	1542.94
L72	187200	1601.46	L96	189600	1581.18	C20	192000	1561.42	C44	194400	1542.14
L73	187300	1600.60	L97	189700	1580.35	C21	192100	1560.61	C45	194500	1541.35
L74	187400	1599.75	L98	189800	1579.52	C22	192200	1559.79	C46	194600	1540.56
L75	187500	1598.89	L99	189900	1578.69	C23	192300	1558.98	C47	194700	1539.77
L76	187600	1598.04	L00	190000	1577.86	C24	192400	1558.17	C48	194800	1538.98
L77	187700	1597.19	C01	190100	1577.03	C25	192500	1557.36	C49	194900	1538.19
L78	187800	1596.34	C02	190200	1576.20	C26	192600	1556.55	C50	195000	1537.40
L79	187900	1595.49	C03	190300	1575.37	C27	192700	1555.75	C51	195100	1536.61
L80	188000	1594.64	C04	190400	1574.54	C28	192800	1554.94	C52	195200	1535.82
L81	188100	1593.79	C05	190500	1573.71	C29	192900	1554.13	C53	195300	1535.04
L82	188200	1592.95	C06	190600	1572.89	C30	193000	1553.33	C54	195400	1534.25
L83	188300	1592.10	C07	190700	1572.06	C31	193100	1552.52	C55	195500	1533.47
L84	188400	1591.26	C08	190800	1571.24	C32	193200	1551.72	C56	195600	1532.68
L85	188500	1590.41	C09	190900	1570.42	C33	193300	1550.92	C57	195700	1531.90
L86	188600	1589.57	C10	191000	1569.59	C34	193400	1550.12	C58	195800	1531.12
L87	188700	1588.73	C11	191100	1568.77	C35	193500	1549.32	C59	195900	1530.33
L88	188800	1587.88	C12	191200	1567.95	C36	193600	1548.51	C60	196000	1529.55
L89	188900	1587.04	C13	191300	1567.13	C37	193700	1547.72	C61	196100	1528.77

Рисунок 2.4.5 - звичайна 100-гігагерцова DWDM сітка

Відразу встановимо, що, як і в CWDM системах, кожен канал - це інформаційний потік в одну сторону, а значить, для повноцінного обміну даними їх необхідно два (30 повноцінних дуплексних каналу в діапазоні С і 26 -

в діапазоні L, всього - 56 повноцінних дуплексних каналу). Крім звичайної 100-гігагерцової сітки використовують 200-гігагерцові сітки (непарні канали C-діапазону). Це пов'язано з тим, що деяка кількість виробників DWDM обладнання не здатне виробляти мультиплексори для 100-гігагерцових сіток. Це пов'язано з тим, що комплектуючі для неї досить дорогі і повинні бути більш високої якості щодо 200 ГГц систем.

Дуже рідко використовуються DWDM системи ущільнення з 50-гігагерцовий сіткою. Це означає, що між двома сусідніми основними каналами звичайної 100-гігагерцової сітки розташований додатковий підканал. Такі канали називаються Q і H: Q - підканали в діапазоні L (наприклад, Q80 - частота 188050ГГц, довжина хвилі 1594.22нм), H - підканали в діапазоні C (наприклад, H23 - частота 19230ГГц, довжина хвилі 1558.58нм). У таких системах ущільнення в діапазоні C знаходиться 61 основний канал і 61 додатковий, всього - 122 канали. У діапазоні L - 53 основних і 53 подканала, всього - 106 каналів. Сумарна потужність  $122 + 106 = 228$  односпрямованих каналів, або 114 повноцінних дуплексних каналу зв'язку. Часове ущільнення можна реалізувати подібно до того, як воно здійснюється в технології GERON: Розподіл часових комірок буде проводитись в режимі черги (реєстрації), тобто, часових комірок буде стільки, скільки користувачів користуються системою в даний момент часу, а не фіксована кількість. При підключенні нового користувача обладнання терміналу буде надсилати повідомлення про підключення і отримувати свій порядковий номер у черзі (розміщуватись в кінці черги), при відключенні – станція надсилатиме терміналам, що знаходились в черзі після відключеного терміналу «узгоджуюче» повідомлення про зміну їхнього часового вікна. Це дозволить більш ефективно використовувати лінію зв'язку, не завантажуючи її «пустими» пакетами.

Передача інформації в даній системі здійснюється за принципом паралелізму, тобто передача в груповому каналі здійснюється методом, як хвильового, так і часового ущільнення. Відповідно, якщо максимальна швидкість при TDM без спотворення сигналу дорівнює 10 Гбіт/с., то



максимальна швидкість групового потоку буде  $10 \cdot (\text{кількість передавачів})$  Гбіт/с. Але це буде максимальна швидкість передачі при ідеальних умовах, адже певний час буде витрачатись на інкапсуляцію та декапсуляцію даних.

Дана система також має бути простою у вдосконаленні, при потребі збільшення пропускної здатності чи максимальної кількості користувачів. Таким чином можна використовувати один з двох варіантів вдосконалення:

- Збільшення кількості передавачів
- Додавання контрольного модуля (рис. 2.4.6).

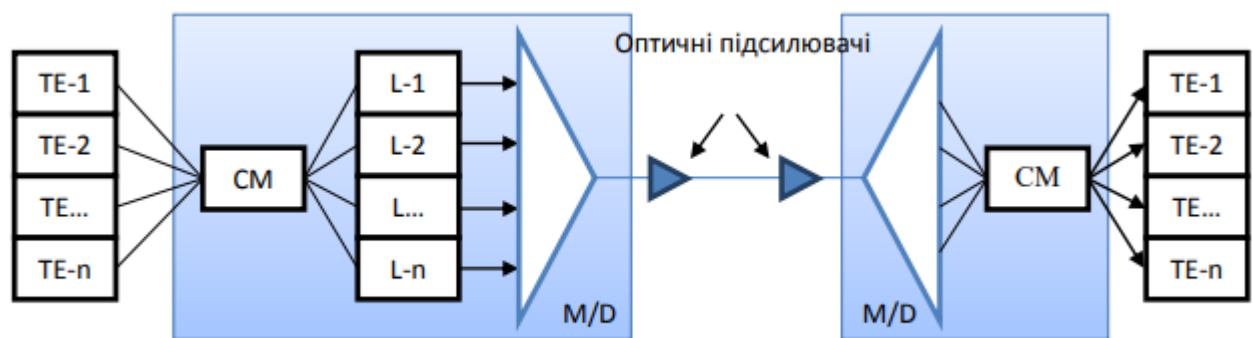


Рисунок 2.4.6 – Схема системи мультиплексування з кількома контролюючими модулями.

## 2.5 Нелінійні оптичні явища. Проблеми при збільшенні пропускної здатності

Намагання збільшити довжини пасивних ділянок ВОЛЗ зумовили необхідність введення у волокно, великої оптичної потужності. Проте було показано, що при потужності випромінювання в декілька мВт і вище починають виникати та впливати на якість зв'язку, нелінійні оптичні явища. Залежність коефіцієнта заломлення від інтенсивності призводить до декількох ефектів. Зі збільшенням рівня потужності і числа оптичних каналів, нелінійні ефекти можуть стати проблемним чинником в системах передачі. Аналогові ефекти можуть бути розділені на дві категорії:

1. Явища показника заломлення які викликають фазову модуляцію:
  1. Фазова автомодуляція (SPM);
  2. Перехресна фазова модуляція (XPM);
  3. Чотирьох хвильове зміщення (FWM).
2. Стимульовані явища розсіювання приводять до втрат потужності:
  1. Стимульоване раманівське розсіювання (SRS);
  2. Стимульоване розсіювання Мандельштама-Брілюєна (SBS).

Нелінійні ефекти залежать від нелінійності показника заломлення  $n$  і причина в його збільшенні—потужність сигналу. Так само нелінійні ефекти, такі як FWM, SPM, і XPM утворюються в оптичному волокні легованому ербієм (EDFA) при високій продуктивності.

#### 2.5.1 Фазова автомодуляція (SPM)

Фазовою автомодуляцією (Self-Phase Modulation - SPM) називається ефект, що виникає при впливі сигналу на власну фазу. З високими потужностями випромінювання світло викликає зміну показника заломлення оптоволокна, відомого як ефект Керра. Показник заломлення який змінюється в часі модулює фаза передаючої довжини хвилі, розширюючи довжину хвилі спектру переданого оптичного імпульсу (рис. 2.5.1.1).

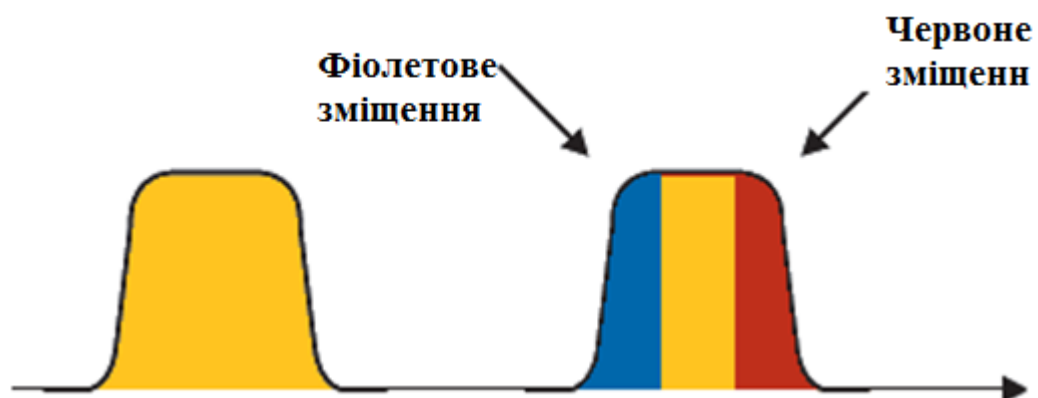


Рисунок 2.5.1.1 Фазова автомодуляція (SPM) сигналу на волокні

Результатом є зсув до більш короткої довжини хвилі в задньому фронті імпульсу (синє зміщення) так само як зсув до більш довгої довжини хвилі в передньому фронті імпульсу (червоний зсув). Зсув довжини хвилі через SPM зменшується при позитивній хроматичній дисперсії. За рахунок хроматичної дисперсії при проектуванні мережі, SPM може бути частково компенсовано.

### 2.5.2 Перехресна фазова модуляція

Перехресна фазова модуляція (Cross-Phase Modulation - CPM) називається ефект при якому сигнал в одному каналі змінює фазу в іншому каналі. Подібно SPM, CPM відбувається через ефект Керра. Однак, ефекти перехресної фазової модуляції виникають тільки при передачі великої кількості каналів в одному волокні. Коли одночасно дві світлові хвилі поширюються через оптичне волокно, то через нелінійність середовища вони можуть взаємодіяти одна з одною. Перехресна фазова модуляція, так само як і самомодуляція, виникає внаслідок залежності показника заломлення від інтенсивності випромінювання. Полягає у виникненні нелінійного набігу фази світлового імпульсу, наведеного на іншій частоті, оптичним полем іншого імпульсу, що поширюється спільно з даними імпульсом.

### 2.5.3 Чотирьох хвильове зміщення (FWM)

Для розглядання цього нелінійного оптичного явища будемо припускати, що в середину волокна вводиться два оптичних коливання з початковими частотами  $f_{H1}$  і  $f_{H2}$ , при чому  $f_{H1} > f_{H2}$ . Кванти енергії, тобто фотони цих коливань зустрічаються з мікрочастинками (молекулами) середовища розповсюдження і взаємодіють з ними. Ці молекули, володіючи визначеною енергією, мають деяку частоту власних коливань  $f_M$ . При зіткненні з такими молекулами фотони переводять їх в стан з більш високим енергетичним рівнем. Це відбувається тому, що фотони при цьому віддають



молекулам частину своєї енергії. Енергія фотонів (кожного фотона) зменшується, і вони переходять в стан з більш низьким енергетичним рівнем. Так як енергія фотона дорівнює  $h \times f$ , де  $h$  - стала Планка, то зменшується множник  $f$ , тобто частота.

Таким чином, в серцевині волокна, в яку введені два оптичних коливання з початковими частотами  $f_{H1}$  і  $f_{H2}$ , виникають складові компоненти оптичного випромінювання з частотами  $f_{C1} = f_{H1} - f_M$  і  $f_{C2} = f_{H2} - f_M$ . В результаті частотний спектр розсіяного сигналу буде містити коливання з чотирма значеннями частот:  $f_{H1}$ ,  $f_{H2}$ ,  $f_{C1}$  і  $f_{C2}$ . Оскільки  $f_{H1} > f_{H2}$ , то можливі випадки коли  $f_{C1} = f_{H2}$ . При цьому складова з частотою  $f_{C2}$  збільшуватиметься по інтенсивності і може збільшити імовірність переходу деякого числа молекул в наступний коливальний стан, наприклад з частотою  $2f_M$ , при якому може виникнути фотон з частотою  $f_{C3} = f_{H2} - 2f_M$ . Можуть бути фотони і з другими комбінаціями частот. В результаті цих комбінацій частотний спектр розсіяного випромінювання розширюється, причому деякі складові можуть підсилюватись за рахунок подавлення других коливань. Таке нелінійне оптичне явище отримало назву чотирьох хвильового змішування. В англomовній літературі воно має абревіатуру FWM – Four Wavelength Mixing. Нелінійний процес чотирьох хвильового змішування по своїй природі являється широкосмуговим. При передачі мультиплексних сигналів  $\lambda_{1+2+3+...+N}$  степiнь впливу ЧХЗ на якісні параметри PTS істотно залежать від дисперсійних властивостей волокна фотонного лінійного тракту. Цей вплив проявляється, перш за все, в виді додаткових перехідних перешкод, які завжди мають місце між оптичними трактами. Найбільш паразитний вплив ЧХЗ надає в тих PTS, в лінійних трактах яких використовуються одномодові волокна зі зміщеною нульовою дисперсією, тобто волокна типу DSF. Пояснюється це тим, що при зміщенні нульової дисперсії всі складові спектра мультиплексного сигналу  $\lambda_{1+2+3+...+N}$  розповсюджуються практично з однаковою швидкістю і в кожен момент часу присутні в будь-якому січенні волокна.

#### 2.5.4 Раманівське розсіювання

Вимушене комбінаційне розсіяння (ВКР), яке інакше називається розсіянням Рамана-Мандельштама, виникає у волокні тоді, коли потужність досягає певного відносно високого порога. З точки зору фізики ВКР виникає при взаємодії фотонів, які проходять через середовище з молекулами та атомами даного середовища. При цьому можуть виникати ситуації, коли молекули поглинають частину енергії випромінювання, що проходить.

Одним з важливих властивостей ВКР є великий частотний діапазон взаємодії випромінювання, що проходить через середовище з молекулами та атомами речовини. Таким чином, процес раманівського розсіяння являється широкосмуговим. При деякій початковій потужності накачки  $P_H$  ввідного у волокно випромінювання, виникає умова, коли вся енергія цього випромінювання на виході волокна довжиною  $L$  і коефіцієнтом затухання  $\alpha$  переходить в стоксові компоненти. Ця умова виконується в тому випадку, якщо потужність накачки  $P_H$  описується виразом:  $P_H = P_0 \times \exp(-\alpha \times L)$ . Де  $P_H = I_0 \times A_{\text{ЕФФ}}$  – порогове значення потужності накачки;  $I_0$  – інтенсивність видимого випромінювання;  $A_{\text{ЕФФ}}$  – ефективна площа поперечного січення волокна. З представленого відношення слідує, що порогова потужність накачки  $P_0$  пропорційна ефективній площі поперечного січення волокна  $A_{\text{ЕФФ}}$ . Тому цей параметр являється одним з паспортних даних одномодових волокон, які використовуються у сучасних лінійних трактах PTS різних технологій для передачі оптичних мультиплексних сигналів.

#### 2.5.5 Вимушене розсіяння Бріллюена-Мандельштама

Вимушеним розсіюванням Бріллюена - Мандельштама (Stimulated Brillouin Scattering - SBS) є явище зворотнього розсіювання, що викликає втрату потужності. Зміна енергетичних квантових станів молекул і атомів при достатньо високому рівні потужності проявляється в тому, що виникають коливні рухи молекул, які приводять до флуктуацій густини речовини, так

званих акустичних фононів. На цих фонах виникає нелінійне розсіяння світла під час якого фотони віддають частину енергії акустичним фоновим. Як наслідок у спектрі випромінювання з'являються нові компоненти, які за аналогією з ВКР називають стоксовими. На відміну від ВКР, ВРМБ виникає при значно нижчих потужностях і направлене в бік, протилежний розповсюдженню інформаційного сигналу. У системах ВОЛЗ ВРМБ проявляється в підвищенні затухання оптичного сигналу, виникненні відносно низькочастотної модуляції. Основний вплив ВРМБ полягає в тому, що розсіяне у напрямку джерела випромінювання впливає на лазер, створює паразитну модуляцію випромінювання, яка проявляється, насамперед, у вигляді шуму. Наступна таблиця підсумовує різні явища, пов'язані погіршенням роботи приймально-передавальної апаратури при передачі світла по оптоволокну.

Таблиця 2.5.5.1 Нелінійні ефекти в оптичному волокні

Назва	Причина	Ефекти	Компенсація ефекта
Загасання	Поглинання	1. Більш короткі довжини волокна 2. Збільшення числа бітових помилок	Використання чистішого волокна
Хроматична дисперсія	Залежність від довжини хвилі швидкості проходження	1. Збільшення числа бітових помилок	Компенсація дисперсії або модулі (DCF / DCM)
Вимушене розсіювання Рамана (SRS)	Взаємодія сигналу з розшарованою молекулярною структурою	1. Оптичні перехресні перешкоди (особливо в двонаправленій системі WDM) 2. Збільшення числа бітових помилок	Обережна зміна потужності

Продовження таблиці 2.5.5.1

Поляризаційна модова дисперсія (PMD)	Поляризаційна різниця швидкості проходження	1.Збільшення числа бітових помилок	Нове волокно з низьким значенням PMD. Компенсатори PMD
Чотирьох хвильове змішання (FWM)	інтерференція сигналу	1.Генерація гармонік 2.Оптичні перехресні завади 3.Збільшення числа бітових помилок	Використання волокна зі зміщеною дисперсією. Зміна частот каналів
Фазова автомодуляція (SPM). Перехресна фазова модуляція (CPM)	Зміна коефіцієнта заломлення від потужності	1. Спектральне розширення. 2. Початкове стиснення імпульсу при позитивній дисперсії. 3. Прискорене розширення імпульсу при негативній дисперсії 4. Перехресні перешкоди каналу через ефекти накладення 5. Збільшення числа бітових помилок	Використання волокна зі зміщеною дисперсією

Продовження таблиці 2.5.5.1

Вимушене розсіювання Рамана (SRS)	Взаємодія сигналу з розшарованою молекулярною структурою	1. Оптичні перехресні перешкоди (особливо в двонаправленій системі WDM) 2. Збільшення числа бітових помилок	Обережна зміна потужності
Вимушене розсіяння Бріллюен-Мандельштама (SBS)	Взаємодія сигналу з акустичною хвилею	1. Нестабільність сигналу 2. Зменшена пікова потужність 3. Зменшений OSNR 4. Оптичні перехресні перешкоди (особливо в двонапрямлених системах WDM) 5. Збільшені бітової помилки	Спектральне розширення

## 2.6 Висновки по розділу 2

В даному розділі було вирішено, яким чином буде забезпечуватися збільшення пропускної здатності у ВОСП. Проведено аналіз та надано характеристику методів мультиплексування потоків даних. Запропоновані рекомендації щодо використання багатохвильових каналів оптоволоконного зв'язку, що сприяють ущільненню компонент інформаційних потоків. Розглянуто нелінійні оптичні явища, наслідки до яких вони призводять та методи їх компенсації. Таким чином для підвищення пропускної здатності ліній зв'язку замість збільшення швидкості передачі у оптичному каналі, як це робиться в системах TDM, в системах WDM йдуть шляхом збільшення числа каналів (котрі передаються на різних довжинах хвиль), що застосовуються у системах передачі.

Технологія WDM дозволяє суттєво збільшити пропускну здатність лінії зв'язку, дає можливість організувати двухсторонню передачу даних по одному

волокну, причому нарощування пропускної здатності може відбуватись на вже існуючому волоконно-оптичному кабелі. Зазначу, що можливості й переваги технології WDM, у ще більшому ступені розкриваються в складних мережах зв'язку, що містять багато різних вузлів. На проміжних вузлах спектральні канали можуть бути додані або виділені зі складеного сигналу за допомогою мультиплексорів введення/виводу, а інші канали проходять через вузол без перетворення в електричний сигнал. Всі розглянуті компоненти, дозволяють виконати поставлене завдання.

## РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ ВОСП З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ WDM

### 3.1 Структура ОЛТ ВОСП з WDM

Узагальнена структурна схема ВОСП без пристроїв компенсації і лінійних підсилювачів представлена на рисунку 3.4. Передавач ВОСП забезпечує перетворення вхідного електричного сигналу в вихідний світловий сигнал. Швидкість передачі в лінії сучасних систем синхронної цифрової ієрархії становить 2,5 - 40 Гбіт/с. Відповідно тривалість імпульсу джерела оптичного випромінювання не повинна перевищувати 0,2 - 0,05 нс. Це вимагає застосування когерентних джерел випромінювання - лазерів.

У загальному випадку передавач включає в себе лазерний діод (ЛД), модулятор (М) і кодек, на який надходить кодова послідовність від ЦСП.

Модулятор виробляє модуляцію генерується лазером оптичної несучої.

Кодек здійснює перетворення коду ЦСП (аналогового сигналу) в лінійний код оптичної системи передачі і назад.

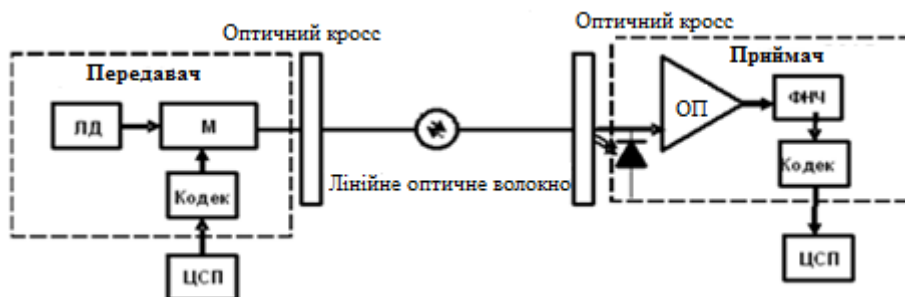


Рисунок 3.4 Спрощена структурна схема ВОСП

Приймач ВОСП здійснює зворотнє перетворення вхідних оптичних імпульсів у вихідні імпульси електричного струму. Він включає в себе фотодіод (ФД), ОП, фільтр нижніх частот (ФНЧ) і кодек. Основний елемент - ФД. Застосовуються ріп або лавинні фотодіоди, що мають дуже малу інерційність.

Оптичний крос служить для оперативного з'єднання і роз'єднання оптичних волокон станційних і лінійних оптичних кабелів в процесі технічної експлуатації ВОЛП.

### 3.2 Вибір типу джерела випромінювання і фотоприймача, їх параметри

Загальні вимоги до джерел випромінювання ВОСП наступні:  $\lambda$  випромінювання джерела повинна збігатися з одним з мінімумів спектральних втрат ОВ; конструкція джерела повинна забезпечувати досить високу потужність вихідного випромінювання і ефективний введення його в ОВ; джерело повинне мати високу надійність і великий термін служби; габаритні розміри, маса і споживана потужність повинні бути мінімальними; простота технології повинна забезпечувати невисоку вартість і високу відтворюваність характеристик.

У високошвидкісних ВОСП значні вимоги пред'являються і до динамічних характеристик джерел світла. Зручніше за все використовувати оптичні випромінювачі, що допускають пряму модуляцію інтенсивності, частоти або фази випромінювання без істотних змін інших параметрів (модового складу, діаграми спрямованості і т.д.).

Джерелами випромінювання в оптичних передавачах з прямою модуляцією є напівпровідникові світловипромінюючі діоди (СВД) або лазери. Передавачі на основі світлодіодів використовуються спільно з багатомодовим волокном в низькошвидкісних системах передачі інформації на короткі відстані. Основними недоліками світлодіодів є мала швидкість передачі інформації, мала вихідна потужність, широка смуга спектра і велика розсіюваність випромінювання. Залежно від швидкості передачі ( $B$ ) і енергетичного потенціалу ( $E$ ), які беруться з (табл. 3.2.1), вибираємо пару джерела випромінювання і фотодіода (рис 3.2.1).



Таблиця 3.2.1 Параметри СВД і ЛД

Параметр	СВД	FP	DFB	VCSEL
Довжина хвилі, нм	850/1310	1310/1550	1310/1550	850/1310
Потужність на стику з ОВ, дБм	-10...-15	0	-1 ... 2	0
Спектральна ширина лінії, нм	30-60	<3	<0.1	<3
Максимальна швидкість, Гбіт/с	<0.155	> 2	> 10-40	2
Тип волокна	MMF	SMF, NZDSF	SMF, NZDSF	MMF, SMF
Ціна	Низька	Висока	Висока	Помірна
Час напрацювання на відмову, год	109	108	108	108

SMF - стандартне одномодове волокно, MMF - багатомодове волокно, NZDSF - волокно зі зміщеною ненульовою дисперсією

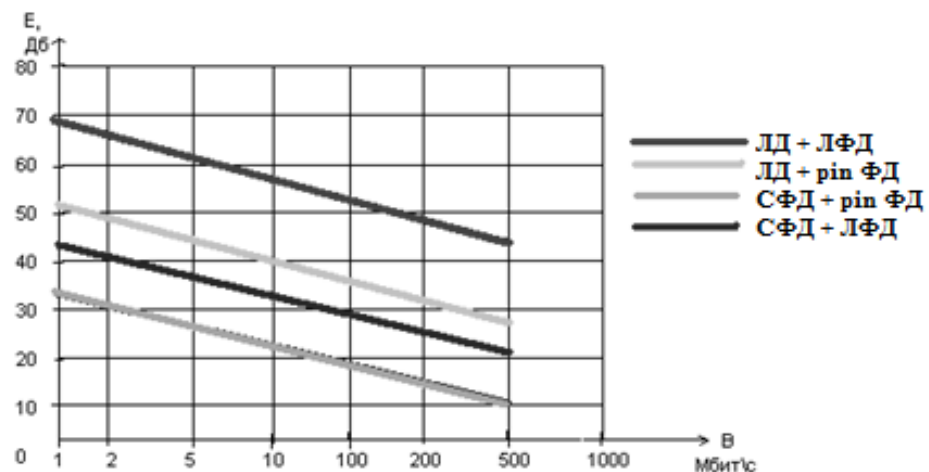


Рисунок 3.2.1 Залежність енергетичного потенціалу між передавальним і приймальним модулями для різного поєднання джерел випромінювання і фотодіодів від швидкості передачі

У системах зв'язку зі швидкістю менше 2,5 Гбіт/с використовуються найпростіші лазери з резонатором Фабрі - Перо і прямою модуляцією. При швидкостях передачі інформації  $B = 2,5$  Гбіт/с і вище необхідно використовувати лазери з розподіленим зворотним зв'язком (DFB), в яких забезпечується ефективна селекція мод і звуження спектра випромінювання. Гідність VCSEL: можливість масового виробництва і тестування, що веде до значного зниження їх вартості.

Переваги: вузька смуга випромінювання, високий час напрацювання на відмову, кругла форма перетину променя. Але доступна потужність випромінювання не перевищує 7 мВт на діод в багатомодовому режимі, тому для збільшення вихідної потужності застосовують кілька випромінювачів, що працюють синхронно.

При проектуванні оптичної системи передачі на 10 Гбіт/с і  $\lambda = 1550$  нм як джерело краще використовувати DFB лазер фірми Nel - NLK3C8CAKB тому, що: працює в необхідному оптичному діапазоні і забезпечує в ньому потужність 1 дБм, даний тип лазера має вузький спектр випромінювання ( $\lambda < 0.1$  нм); має високий рівень придушення бічних мод (35дБ); максимальна швидкість передачі 10 Гбіт/с; даний тип лазера має інтегрований в корпус електро-абсорбційний модулятор, що дає вигоду в комбінації лазер + модулятор за ціною і робить систему більш компактною.

Таблиця 3.2.2 Порівняння лазерних модулів

Характеристики	Тип лазерного модуля					
	ПОМ - 03545	ЛПН- 602м	JDSU 54TM- 3XYZ	CyOptics D2500	CyOptics E3500	Nel NLK3C8CA KB
Діапазон робочих довжин хвиль, нм	1500 ... 1550	1500 ... 1550	1500 ... 1580	1530 ... 1570	1530 ... 1563	1530 ... 1565

## Продовження таблиці 3.2.2

Потужність випромінювання, дБм	0	0	-1.5 ... 2	1	0	-1 ... 2
Граничний струм накач. мА	25	30	20 ... 50	12 ... 50	5 ... 35	15 ... 30
Опір терморезистора, кому	19	10	15	10	10	10
Максимальний струм мікрохолодильників, А	0.5	1	1	1	1.3	1.2
Рівень придушення бічних мод, Дб	-	-	30	30	30	35
Час наростання, спаду (за рівнями 20/80%), пс	-	-	150	130	125	125
Максимальна швидкість передачі, Гбіт / с	0.155	0.622	2.5	2.5	2.5	10

Найбільш поширені у ВОСП два типи фотодетекторів: pін-фотодіод і лавинний фотодіод (APD).

Pin: виділяють pін-фотодіоди на основі кремнію і InGaAs. Чутливість виражається в А / Вт або В / Вт і є мірою електричної потужності, яку можна очікувати на виході фотодіода, відданої певної, падаючої на вхід, світлової потужністю сигналу. Для фотодіодів чутливість відгуку  $R$  пов'язана з довжиною хвилі світлового потоку  $\lambda$  і квантовою ефективністю  $\eta$ , тією частиною падаючих фотонів, які виробляють пари електрон - дірка:  $R = \frac{\eta \lambda}{1234}$  (А / Вт), де  $\lambda$ - в нм.

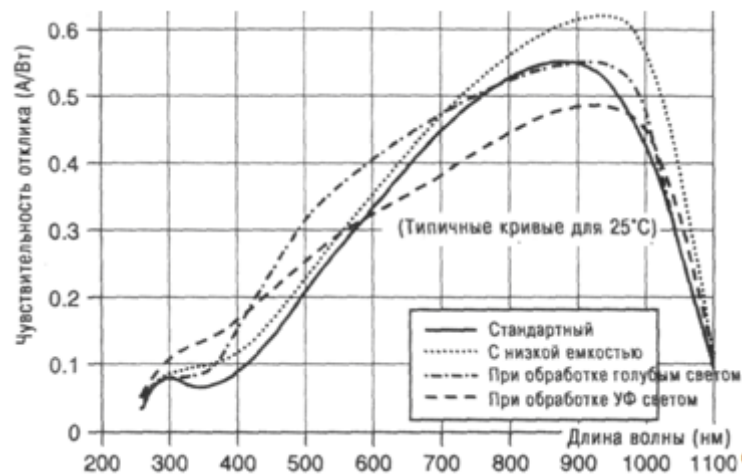


Рисунок 3.2.2 Залежність чутливості від довжини хвилі для кремнієвих фотодіодів

Як видно з рисунків, кремнієві фотодіоди можуть використовуватися в діапазоні коротких хвиль (850 нм), тоді як фотодіоди типу InGaAs - в діапазонах хвиль 1310 і 1550 нм.

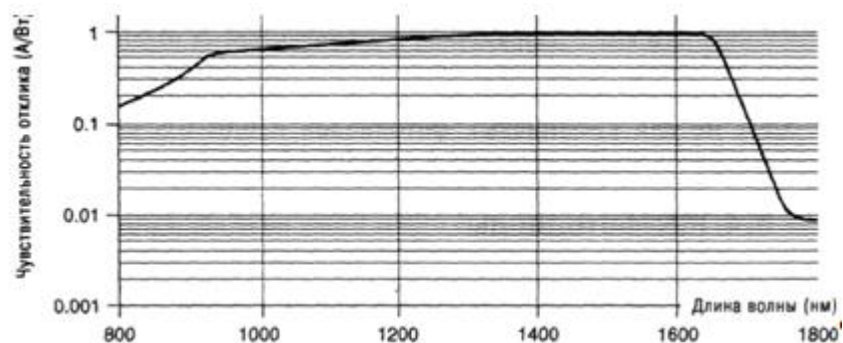


Рисунок 3.2.3 Залежність чутливості від довжини хвилі для фотодіодів типу InGaAs

APD фотодіод представляє з себе p-n діод з посиленням. У нього структурі є додаткова область посилення, приклавши напругу до якої можна домогтися ефекту ударної іонізації. Ця підсилювальна зона досить велика, щоб забезпечити корисне посилення близько 100 (дБ) для кремнієвих APD і 10-40 для германієвих і InGaAs APD. У APD фотодіодів є і недоліки - вони характеризуються коефіцієнтом надлишкового шуму ( $F$ ), тобто разом з посиленням вони вносять в сигнал додатковий шум.

Чутливість приймачів оптичного випромінювання. Важлива робоча характеристика ВОСП, що визначає якість зв'язку - це коефіцієнт помилок (BER). Його значення дорівнює відношенню числа помилково інтерпретованих символів до загальної кількості переданих символів. Причина виникнення помилок - наявність шумів. У реальних системах зв'язку значення фотоструму, відповідні 1, і 0, здійснюють флуктуацію в часі через наявність шумів. Такі тимчасові флуктуації струму можуть призвести до помилкової інтерпретації інформаційного символу. Природу виникнення помилок в цифрових системах зв'язку з амплітудною модуляцією пояснює (рис 3.2.4).

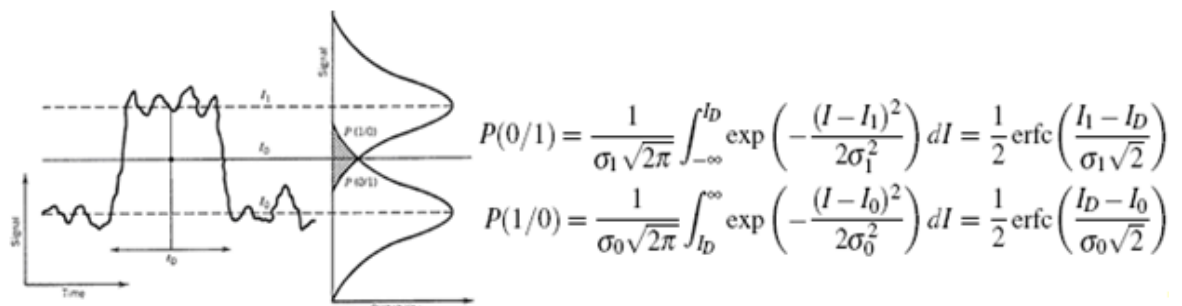


Рисунок 3.2.4 Електричний інформаційний сигнал з шумом на вході схеми порівняння

Рівень нуля  $I_0$ , рівень одиниці  $I_1$ , рівень порівняння  $I_D$ , тривалість такту  $t_D$  (зліва) і розподілу ймовірностей вимірюваних значень струму сигналу для 1 і 0 (праворуч). Зафарбовані області показують ймовірності помилок:  $P(1/0)$  - ймовірність інтерпретації 0 як 1;  $P(0/1)$  - ймовірність інтерпретації 1 як 0.

При рівній ймовірності передачі 0 і 1 коефіцієнт помилок визначається простим виразом:

$$K_{\text{пом}} = \frac{1}{2} (P(1/0) + P(0/1))$$

У припущенні гаусівського розподілу шуму з нульовими середніми значеннями інтенсивності і зі середньоквадратичними відхиленнями  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  для 1 і 0 відповідно коефіцієнт помилки визначається виразом:

$K_{\text{пом}}(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^{\infty} dx \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$ , де  $Q = \left(\frac{I_1 - I_2}{\sigma_1 + \sigma_2}\right)$  - показник якості сигналу.

Для нормальної роботи ВОСП потрібно, щоб шум не перевищував деякого заданого значення. При фіксованій швидкості передачі інформації і нехтуванні шумами самого світлового сигналу шуми фотоприймача можна вважати постійними і це не залежать від потужності світла. В цьому випадку  $K_{\text{пом}}$  зменшується при збільшенні амплітуди корисного сигналу і збільшується при його зменшенні. Мінімальне значення середньої потужності оптичного випромінювання, необхідне для передачі сигналів із заданим BER, називається чутливістю оптичного приймача.

Зі збільшенням швидкості передачі інформації чутливість погіршується (тобто зростає) в лінійних одиницях приблизно пропорційно швидкості  $B$  [біт/с].

Для InGaAs/InP APD, призначених для систем ВОСП з великою довжиною хвилі, можна отримати поліпшення принаймні в 7 дБ в порівнянні з рпн приймачами на швидкості 2.5 Гбіт/с і 5 - 6 дБ на швидкості 10 Гбіт/с.

Однак, при проектуванні високошвидкісної системи передачі я зробив вибір на користь InGaAs рпн діода. Це обумовлено наступними факторами:

- а) рпн діоди мають велику напрацювання на відмову
- б) рпн діоди менш чутливі до зміни температури і більш прості в обігу;
- в) рпн діоди значно дешевші APD (за даними Farnell.com рпн діоди в 10 20 разів дешевше APD);

### 3.3 Оцінка параметрів оптичного волокна

#### 3.3.1 Вибір робочої довжини хвилі

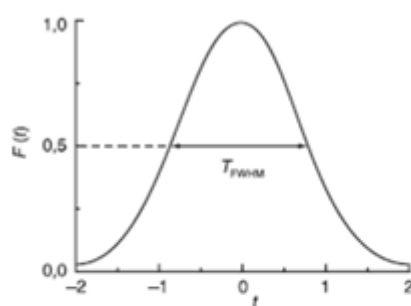
Форма і тривалість оптичних імпульсів. Оптичні імпульси характеризуються залежністю:  $P(t) = P_0 F(t)$ . Тривалість імпульсів характеризують повною тривалістю TFWHM (TFWHM - це час, протягом якого потужність імпульсу постійно перевищує половину від максимального значення). За рівнем половини максимальної потужності (full width at half-maximum). Міра тривалості імпульсу - корінь з тимчасової дисперсії імпульсу  $\sigma_t$ . Сама тимчасова дисперсія  $\sigma_t^2$ :

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{\varepsilon} \int_{-\infty}^{\infty} t^2 P(t) dt - t_0^2 = (t^2) - (t)^2, \quad (3.3.1)$$

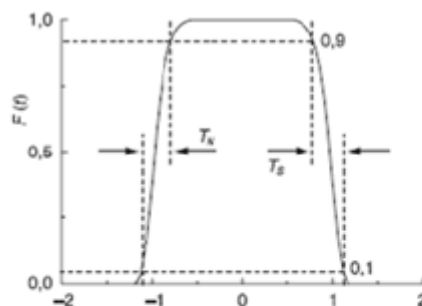
де  $\varepsilon = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt$  - енергія імпульсу і  $t_0 = \frac{1}{\varepsilon} \int_{-\infty}^{\infty} t P(t) dt = (t)$  координата центру імпульсу, яку можна вважати часом прибуття імпульсу, а кутові дужки означають операцію усереднення за часом.

Імпульси стандартної форми. При теоретичному аналізі роботи систем зв'язку часто використовуються імпульси стандартної форми, перераховані нижче. Гаусів імпульс  $F(t) = \exp(-t^2/T_0^2)$ ,  $T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2} T_0 = 1,665 T_0 = 2,35 \sigma_t$ .

Супергаусівський імпульс  $F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{T_0}\right)^{2m}\right]$ . При  $m = 1$  форма цього імпульсу являє собою звичайний гаусівський імпульс. Зі збільшенням  $m$  передній і задній фронти супергаусівського імпульсу стають все більш крутими. Якщо визначити тривалість переднього фронту  $T_N$  як час, протягом якого потужність імпульсу зростає від 10 до 90% від пікової потужності, то отримаємо  $T_N = (\ln 9) T_0 / 2m = 1,1 T_0 / m$ ,



**Нормована форма  
гауссового імпульсу**



**Нормована форма супергауссового імпульсу  
при m=5. T<sub>F</sub>- тривалість переднього фронту.  
T<sub>S</sub>- тривалість заднього фронту**

Рисунок 3.3.1.1 Нормовані форми імпульсів

Цей вислів дозволяє оцінити  $m$  з вимірювання  $T_0$  і  $T_N$ . Як видно з формули, збільшення  $m$  призводить до зростання крутизни фронту. При необмеженому збільшенні  $m$  супергаусівський імпульс переходить в прямокутний імпульс.

Прямокутний імпульс:

$$F(t) = \begin{cases} 1, & -T_0 \leq t \leq T_0 \\ 0, & t < -T_0, t > T_0 \end{cases} \quad T_{FWHM} = 2T_0 = 2\sqrt{3}\sigma_t = 3,46\sigma_t, \quad (3.3.2)$$

Оптичний імпульс являє собою сплеск електромагнітного випромінювання кінцевої тривалості, що поширюється уздовж осі  $z$ . Для його повного опису треба задати зміну в часі електричного поля  $E(t, x, y)$  в деякому перетині волокна. Відносний розподіл поля всередині одномодового ОВ в поперечному перерізі часто можна вважати постійним і для багатьох типів ОВ відомим. В цьому випадку імпульс повністю описується залежністю напруженості електричного поля в часі  $E(t)$ , оскільки  $E(t, x, y) = e(x, y) A(x, y) E(t)$ , де  $e(x, y)$ ,  $A(x, y)$  характеризують моду ОВ.

Електричне поле  $E(t)$  короткого оптичного імпульсу коливається з кутовою частотою  $\omega_0$ , відповідної центральній світловій довжині хвилі імпульсу  $\lambda_0$ . Використовується комплексне уявлення поля  $E(t)$ , дійсна частина дорівнює електричному полю  $E(t) = \text{Re} \bar{E}(t)$ . Відокремимо член, швидко осцилюючий на несучій частоті, від більш повільно змінюється компоненти, яка називається комплексною амплітудою поля:  $E(t) = e^{j\omega_0 t} \tilde{U}(t)$ . Комплексна амплітуда представлена у вигляді твору дійсної амплітуди на фазовий множник:

$$\tilde{U}(t) = U(t) e^{j\omega_0 t} \equiv \sqrt{I(t)} e^{j\omega_0 t} = \sqrt{I(0)} \tilde{V}(t) \quad (3.3.3)$$

Інтенсивність оптичного імпульсу пов'язана з потужністю виразом  $P(t) = I(t) S_{eff}$ , де  $S_{eff}$ , - ефективна площа перетину оптичного волокна.

Спектр оптичних імпульсів можна обчислити, використовуючи перетворення Фур'є. Введемо комплексну функцію  $\tilde{E}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} (t) \exp(i\omega t) dt$ . Енергетичний спектр сигналу визначається квадратом модуля функції:

$$\tilde{E}(\omega): p(\omega) = |E(\omega)|^2 \quad (3.3.4)$$

Критичні довжини хвиль і частоти. Оптичне волокно має частоту відсічення (критичну частоту  $f_0$ ), і по ній можлива передача лише хвиль довжиною менше діаметра серцевини ( $\lambda < D$ ).

Підсумовуючи значення поперечних складових  $g$  серцевини і оболонки, отримуємо:

$$g_{12} + g_{22} = k_{12} - k_{22} = k_0 (n_{12} - n_{22}) \quad (3.3.5),$$



де  $k_0 = 2\pi/\lambda = 2\pi \cdot f/c$

$g_{12} = k_{12} - b_2$  - поперечне складова хвильового числа серцевини;

$k_1 = 2\pi/\lambda$  - хвильове число серцевини;

$b$  - коефіцієнт поширення в світловоді.

Для визначення  $f_0$  треба прийняти  $g_2 = 0$ , тому що при значеннях  $g_2 > 0$  поле концентрується в серцевині світловода, а при  $g_2 = 0$  воно виходить з серцевини і процес поширення по світловоду припиняється. Тоді:

$$g_{12} = k_0 (n_{12} - n_{22}), \quad (3.3.6)$$

Помноживши чисельник і знаменник на радіус серцевини  $r_1$ , отримаємо:

$$f_0 = g_1 \cdot c \cdot r_1 / \pi \cdot d (n_{12} - n_{22})^{\frac{1}{2}} \quad (3.3.7)$$

де  $d$  - діаметр серцевини волокна

$$\lambda_0 = V_1 / f_0 = \frac{\pi \cdot d}{g_1 \cdot a \cdot n_1} (n_{12} - n_{22})^{\frac{1}{2}} \quad (3.3.8)$$

де  $g_1 = P_{nm}$  - параметр, що характеризує тип хвилі (моду). Значення  $P_{nm}$  для різних типів хвиль  $\lambda_0$  можна знайти в спеціалізованій літературі по ОК. З формули видно, що чим товще серцевина світловода і чим більше відрізняються  $n_1$  і  $n_2$ , тим більше критична довжина хвилі і нижче  $f_0$ .

При певній  $\lambda$  настає режим, коли  $q = 0$  градусів, хвиля падає на оболонку світловода і відбивається перпендикулярно. У світловоді встановлюється режим стоячої хвилі, і енергія уздовж світловода не поширюється. Це відповідає випадку критичної довжини хвилі. Тому по ОВ можлива передача лише хвиль довжиною менше діаметра світловода ( $\lambda < D$ ).

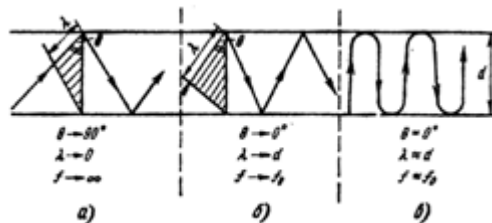


Рисунок 3.3.7 Поширення хвилі в ОВ для частот: а - дуже високих; б - менш високих; в – критичних

Нормована частота. Найважливішим узагальненим параметром ОВ, використовуваним для оцінки його властивостей, є нормована частота  $V$ :

$$V = ((g_1 a) \cdot 2 - (g_2 a) \cdot 2) \frac{1}{2} = ((k_{12} - b_2) + (b_2 - k_{22})) \cdot 2 = (k_{12} - k_{22}) \cdot \frac{1}{2} = 2 \pi a (n_{12} - n_{22}) \frac{1}{2} / \lambda, \quad (3.3.9)$$

Де  $a$  - радіус серцевини оболонки;

$n_1$  - показник заломлення серцевини;

Значення нормованої частоти відсічення відповідає точці перетину кожної кривої з віссю  $V$ . В цьому випадку  $b / k = n_2$  поле випромінюється із світловода і процес поширення припиняється. Нормована частота знаходиться в межах  $0 < V < 2,405$  або  $V = 2 \pi a (n_{12} - n_{22}) \frac{1}{2} < 2,405$ .

З формули видно, що чим менше різниця  $dn = n_1 - n_2$ , тим при більшому радіусі світловода забезпечується одномодовий режим. Так якщо  $n_1 = 1,46$ , то при  $dn = 0,01$  радіус  $a = 2,24 \lambda$ , А при  $dn = 0.003$  отримаємо  $a < 4,09 \lambda$ . Тобто в останньому випадку одномодова передача реалізується при діаметрі серцевини  $d = 8,2 \lambda$ , Що відповідає для довжини хвилі  $1,3$  нм діаметру  $10,7$  мкм.

Визначення профілю показника заломлення. Визначимо профіль показника заломлення, в залежності від виду мережі (таблиця 3.3.1.1), в нашому випадку магістральна мережа.

Таблиця 3.3.1.1

Профіль	Місцева	зонова	Магістральна
n1	1,51	1,51	1,51
n2	1,445	1,47	1,5

### 3.3.2 Розрахунок пропускної здатності ОВ

Метою даного пункту є визначення проміжних частот і відстані між сусідніми каналами.

Розглянемо докладно 3-є вікно прозорості (рис. 3.3.2.1)

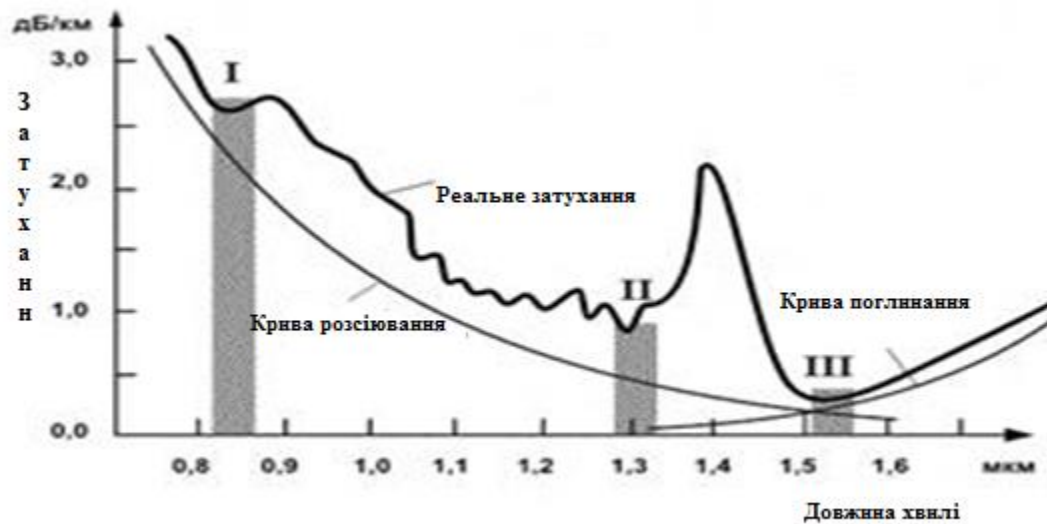


Рисунок 3.3.2.1 Третє вікно прозорості (включаючи сусідні діапазони)

Розглянемо більш докладно робочі діапазони C і L, см. рис 3.3.2.2

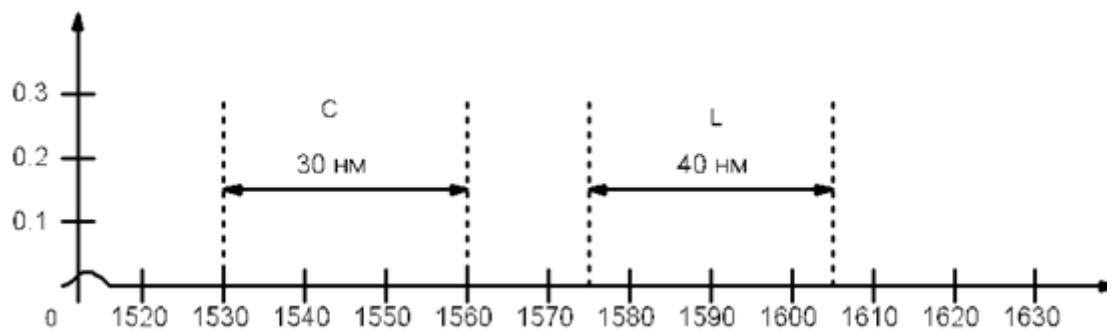


Рисунок 3.3.2.2 Діапазони C - (1530 - 1560) нм і L - (1575 - 1615) нм

Для розрахунку центральних несучих нам знадобиться кордони 3-го вікна прозорості, а саме C і L діапазонів C - (1530 - 1560) нм, L - (1575 - 1615) нм. В C - діапазоні весь інтервал займає 30 нм, а в L - діапазоні - 40 нм, в сумі це 70 нм. Припустимо, що довжина імпульсу світла  $\tau_i = 10^{-9} \text{ с}^{-1} \text{ мкм}$ ,  $\lambda_{12} = 1.551 \text{ мкм}$ , швидкість світла ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ )

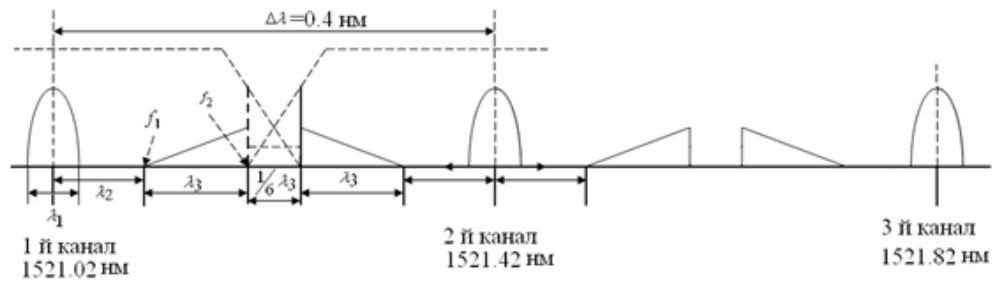


Рисунок 3.3.2.3 Оптичні несучі (передані канали) визначення відстані між сусідніми каналами в 3-м вікні прозорості

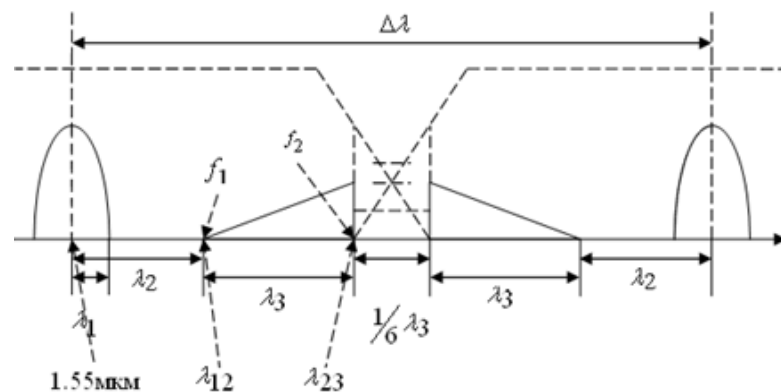


Рисунок 3.3.2.4 Визначення відстані між сусідніми каналами

$$\tau_u = 10^{-9} \text{ c}^{-1}, \quad \lambda_2 = 0.0001 \text{ мкм}, \quad \lambda_3 = 0.000042 \text{ мкм}.$$

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{2}{\tau_e} = \frac{2}{10^{-9}} = 2 \cdot 10^9 \text{ Гц},$$

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_{12}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.551} = 1.93 \cdot 10^{14} \text{ Гц},$$

$$f_2 = \Delta f + f_1 = 1.93 \cdot 10^{14} + 2 \cdot 10^9 = 1.934 \cdot 10^{14} \text{ Гц},$$

$$\lambda_{23} = \frac{c}{f_2} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.934 \cdot 10^{14}} = 1.5512 \text{ мкм},$$

Всі необхідні розрахунки зроблені, залишається знайти відстань між сусідніми каналами, а воно визначається за формулою:

$$\Delta \lambda = 2 \cdot (\lambda_3 + \lambda_2) + \frac{1}{6} \cdot \lambda_3 = 2 \cdot (0.0001 + 0.000042) + \frac{1}{6} \cdot 0.000042 = 0.000293 \text{ мкм} \approx 0,3 \text{ нм} \quad (3.10)$$

Для захисного інтервалу доцільно відвести ще 0,1 нм. У підсумку отримуємо відстань між каналами 0,4 нм. Саме таку відстань між сусідніми

каналами забезпечить нам розміщення 160 каналіву 3-му вікні прозорості в діапазонах С - (1530 - 1560) нм і L - (1575 - 1615) нм.

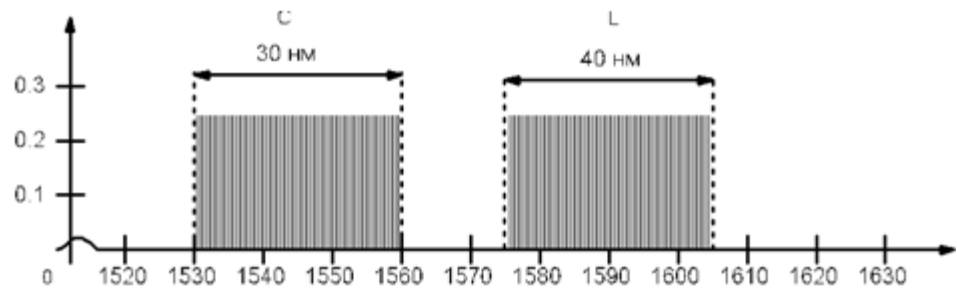


Рисунок 3.3.2.5 Розміщення оптичних несучих в смузі пропускання ОВ в 3-му вікні прозорості.

Бюджет потужності системи. Значення порога чутливості для фотоприймача з рпн фотодетектором визначається наступним виразом:

$$P_{p-i-n} = \frac{A_\lambda}{\eta_m} \sqrt{\bar{i}_{p-i-n}^2} \quad (3.11)$$

де  $A_\lambda = Q_{\text{пом}} (hc / e\lambda)$  коефіцієнт, пропорційний енергії падаючого фотона.  $Q_{\text{пом}}$ -параметр, що характеризує ймовірність помилки (в нашому випадку  $Q_{\text{пом}} = 6,36$  що відповідає  $P_{\text{пом}} = 10^{-10}$ );

$h$ ,  $c$ ,  $e$ -фізичні сталі-  $h$ -стала Планка,  $c$ -швидкість світла,  $e$ -заряд електрона.

$\eta_m$  - квантова ефективність-величина, що показує ефективність перетворення фотон-електрон рівна для сучасних фотоприймачів  $\eta_m = 0,75-0,9$ ,  $\sqrt{\bar{i}_{pin}^2}$ -середньоквадратичне значення шумового струму приймального модуля з рпн фотодіодів.

При довжині хвилі  $\lambda = 1,3$  мкм коефіцієнт  $A_\lambda = 5,7$  Вт / А і при довжині  $\lambda = 1,55$  мкм коефіцієнт  $A_\lambda = 4,8$  Вт / А. Енергія падаючого випромінювання, що відповідає одному і тому ж фотоструму, зменшується зі збільшенням довжини хвилі.

Потужність шуму оптичного приймального модуля з рпн фотодетектором і польовим транзистором на вході можна визначити використовуючи вираз:

$$\bar{i}_{pin}^2 = 4kT(2 * \pi C_\Sigma) B^2 \left[ \frac{I_{n2}}{2K} + \frac{I_{n3}(2\pi C_\Sigma) B F n}{S m} \right], \quad (3.12)$$

де:  $B$  - постійна Больцмана,

$T$ -температура,

$C_{\Sigma}$ - сумарна ємність фотодіода, попереднього підсилювача і монтажу

$F_n$ -шум-фактор польового транзистора

$In_2, In_3$ - інтеграли Персоніка,

$Sm$  - крутизна польового транзистора,

$K$ -коефіцієнт, що характеризує глибину інтегрування у вхідному ланцюзі фотоприймача. (Зазвичай  $K = 10 \div 100$ , так як в протилежному випадку ускладнюється коригуючий пристрій оптичного приймача). Підставляючи (3.12) в (3.11) отримаємо залежність чутливості оптичного приймача від

швидкості передачі:

$$P_{p-i-n} = \frac{A_J}{\eta_m} \sqrt{4kT(2 * \pi C_{\Sigma}) B^2 \left[ \frac{In_2}{2K} + \frac{In_3(2\pi C_{\Sigma}) B F n}{Sm} \right]} \quad (3.13)$$

На рис (3.3.2.6) приведена крива розрахунку чутливості оптичного приймача при наступних параметрах:

$\eta_m = 0,8$ ;  $A\lambda = 4,8 \text{ Вт / А}$ ;  $C_{\Sigma} = 0,5 \text{ пФ}$  (крива 1),  $C_{\Sigma} = 1 \text{ пФ}$  (крива 2);  $In_2 = 0,55$ ,  $In_3 = 0,085$ ;  $Sm = 35 * 10^3 \text{ Див}$ ;  $F_n = 1.5$ .

Наведені криві показують що чутливість оптичного приймача зі збільшенням швидкості передачі інформації швидко зменшується, що призводить до зменшення бюджету системи, що дорівнює різниці рівнів передавального оптичного модуля та чутливості оптичного пристрою.

У системах з WDM в оптичному каналі з'являється додаткові джерела втрат - оптичні мультиплексор і демультимплексор. Для сучасних оптичних мультиплексорів інтерференційного типу величина загасання складає від 1,5 до 5,2 дБ на канал - в залежності від кількості мультиплексуючих каналів. Загасання мультиплексорів інтерференційного типу може змінюватися також залежно від довжини хвилі  $\lambda_m$  - точніше від  $m$  - від номера мультиплексуючого каналу що пов'язано з особливістю його пристрою.

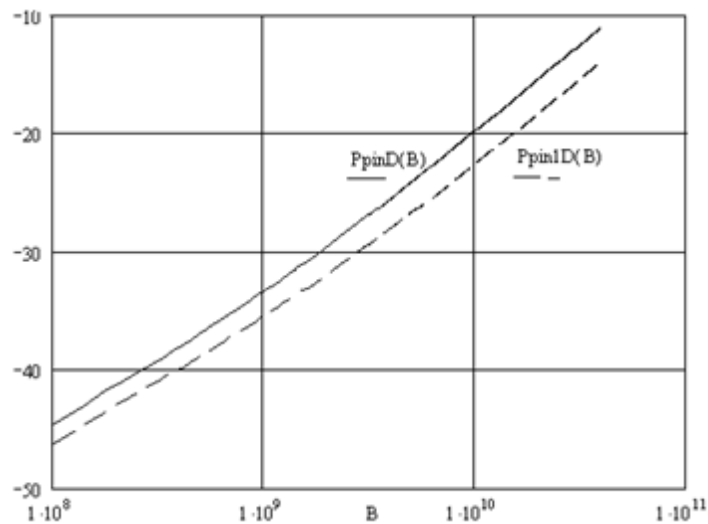


Рисунок (3.3.2.6) Залежність чутливості оптичного приймача з р-і-п фотодіодів від швидкості передачі.

Теоретично значення загасання для оптичних мультиплексорів інтерференційного типу в залежності від числа каналів розраховується за такою формулою:  $a_m = ((0,99^{m-1}) \cdot 0,98)^{-1}$ , де 0,99-коефіцієнт відбиття від плівки, 0,98-коефіцієнт пропускання тонкоплівкового фільтра. Так для мультиплексора на 4 канали воно може коливатися від 1,8 до 2,5 дБ, для мультиплексора на 32 каналу - 4,2 дБ, для мультиплексора на 40 каналів - 5,3 дБ. Перевага цих мультиплексорів - велике перехідне загасання між каналами  $\approx 60$  дБ, мала чутливість до змін температури, недоліки - складність виготовлення і як наслідок - висока вартість. Мультиплексори гратчастого типу відрізняються простотою виготовлення, внесене згасання коливається від 3 до 4,5 дБ для 16 каналів - 3 дБ, для 32 - 4 дБ, для 40 - 4,5 дБ. Недолік - потрібна температурна стабілізація, що збільшує витрати на експлуатацію. Розглянемо можливості проекрованої магістральної лінії. Для цього будемо нарощувати швидкість передачі з  $B_1 = 2,5$  Гбіт/с до  $B_n = 40$  Гбіт/с з кроком 2,5 Гбіт/с, і розраховувати допустиму величину загасання в оптичному тракті  $a_{pin}$ . Бюджет системи для систем WDM з мультиплексорами інтерференційного типу (за умови ідеальності їх конструкції - теоретичний мінімум загасання).

Результати зведемо в таблиці 3.3.2.1 відповідно:

Таблиця 3.3.2.1 Загасання при ущільненні по довжині хвилі (частотний план CWDM) із застосуванням інтерференційних мультиплексорів (теоретичну межу).

Швидкість передачі, $V_m$ , $V_m$ Гбіт / с	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35	37,5	40
Кількість спектрально-ущільнюються каналів $m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\lambda$ на якій ведеться передача (ITU-T G.694.2 -CWDM) $\lambda_m$ , мкм	1,29	1,31	1,33	1,35	1,37	1,39	1,41	1,43	1,45	1,47	1,49	1,51	1,53	1,55	1,57	1,59
$\alpha$ , що вноситься $m$ і $d$ $m$ $\alpha m$	0,087	0,131	0,175	0,218	0,262	0,306	0,349	0,393	0,436	0,480	0,524	0,567	0,611	0,655	0,698	0,742
$\alpha m \times 2$	0,17	0,26	0,35	0,43	0,52	0,61	0,69	0,78	0,87	0,96	1,04	1,13	1,22	1,31	1,39	1,48
чутливою ність $P_{pin}$ , дБ	-27,09	-27,15	-27,22	-27,29	-27,35	-27,41	-27,47	-27,54	-27,6	-27,66	-27,71	-27,77	-27,83	-27,89	-27,94	-28
Бюджет системи, $\alpha_{pin}$ дБ при $P_{пер} = 0$ дБ	26,92	26,89	26,87	26,85	26,83	26,8	26,77	26,75	26,73	26,7	26,66	26,63	26,60	26,58	26,54	26,52



Аналізуючи отримані дані можна сказати, що в високошвидкісних системах застосування технології WDM с точки зору збереження бюджету системи виглядає більш перспективно. Після швидкості 7,5 Гбіт/с при використанні будь-якого з розглянутих типів мультиплексорів видно вигрaш в швидкості передачі.

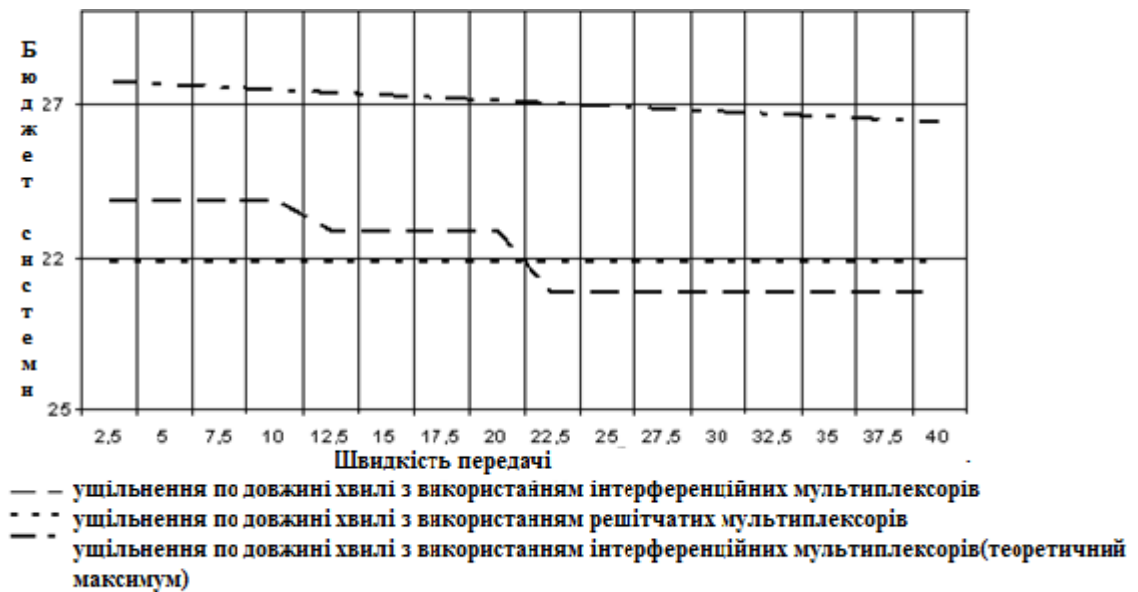


Рисунок 3.2.7. Залежність бюджету потужності системи від швидкості передачі для систем з WDM.

### 3.3.3 Побудова планів частот фотонного лінійного тракту

План частот лінійного тракту (ПЧЛТ) будь-якої фотонної транспортної системи, будь-якої технології XM - CWDM, WDM, DWDM, є стандартною послідовністю довжин хвиль оптичних коливань, які служать для формування модульованих сигналів і їх передачі за різними оптичними трактами. Важливість такого параметра PTS, як рознесення по довжині хвилі між сусідніми оптичними трактами і його стандартизація не викликає сумнівів. По-перше, поява стандартних ПЧЛТ дала можливість класифікувати PTS XM. По-друге, наявність стандартних ПЧЛТ дозволяє

проводити тестування на взаємну сумісність однотипного обладнання PTS різних вендерів .

По-третє, без розуміння того, які обмеження і переваги має кожен ПЧЛТ, оператори зв'язку, які планують нарощування пропускної здатності фотонних транспортних мереж, можуть зіткнутися з зайвими труднощами і інвестиціями.

Реалізація конкретного ПЧЛТ залежить від наступних факторів:

- надання робочого діапазону довжин хвиль у використовуваному ООВ;
- визначення типу, застосовуваних в PLP волоконно-оптичних підсилювачів: TDFA, EDFA, YDFA, розподілених романових підсилювачів (РРП) або їх комбінацій.

Розглянемо план частот лінійного тракту технологій CWDM та WDM. PTSs технології CWDM мають два плана частот. За ПЧЛТ №1 рознесенням по частоті між сусідніми ОТр в середньому - 1250 ГГц, що відповідає рознесенню по довжині хвилі 10 нм. Цей ПЧЛТ дозволяє утворити в С-діапазоні довжин хвиль одного волокна 4 ОТр.

У ПЧЛТ №2 PTSs CWDM рознесення між сусідніми ОТр в два рази більше в середньому - 2500 ГГц (20 нм). Використання ПЧЛТ №2 дозволяє утворити в сумарному (S+C+L)-діапазоні довжин хвиль одного ООВ 8 ОТр.

PTSs технології WDM в С-діапазоні довжин хвиль одного ООВ мають 6 ПЧЛТ з рознесенням між сусідніми ОТр 200, 400, 500/400, 600 і 1000 ГГц, а саме :

- ПЧЛТ № 1 на 25 ОТр з рознесенням між сусідніми ОТр 200 ГГц;
- ПЧЛТ № 2 на 8 ОТр з рознесенням між сусідніми ОТр 600 ГГц;
- ПЧЛТ № 3 на 5 ОТр з рознесенням між сусідніми ОТр 1000 ГГц;
- ПЧЛТ № 5 на 5 ОТр з рознесенням між сусідніми ОТр строго по 400 ГГц;
- ПЧЛТ № 6 на 4 ОТр з рознесенням між сусідніми ОТр строго по 400 ГГц.
- нерівномірний ПЧЛТ № 4 на 9 ОТр з чергується рознесенням між сусідніми ОТр 400 і 500 ГГц;

Аналіз представлених ПЧЛТ дозволяє зробити наступні висновки.

1. ПЧЛТ № 1 з рознесенням 200 ГГц, або з рознесенням довжин хвиль в середньому 1,6 нм забезпечує в С-діапазоні довжин хвиль одного ООВ до 25 ОТр Практично розроблені і використовуються PTS, що утворюють з цього ПЧЛТ 16, 20 або 24 ОТр.

2. Серед представлених ПЧЛТ один є нерівномірним, в якому рознесення частот 400 ГГц і 500 ГГц між сусідніми ОТр чергуються. Такий ПЧЛТ слід визнати невдалим, так як рівномірний розподіл ОТр спрощує виробництво і роботу TETs-транспондерів, перебудовує багаточастотні лазери та інші пристрої PTS, а також дозволяє легко нарощувати пропускну здатність окремих PTS і фотонної транспортної мережі в цілому.

3. ПЧЛТ з рознесенням 600 ГГц (4,8 нм) і 1000 ГГц (8 нм) між сусідніми ОТр в даний час не знаходять широкого застосування, хоча PTS з зазначеними рознесеннями частот були створені.

4. Два альтернативних ПЧЛТ з рознесенням між сусідніми ОТр 400 ГГц (3,2 нм). Вони розраховані на створення 4-х або 5-ти ОТр в довгохвильовій частині С-діапазону довжин хвиль (1546 ... 1560 нм), де амплітудно-хвильова характеристика використовуваних волоконно-оптичних підсилювачів EDFA найбільш рівномірна.

Розглянемо план частот лінійного тракту технологій DWDM и HDWDM. PTSs технології DWDM в принципі мають один ПЧЛТ, де рознесення між сусідніми ОТр становить 100 ГГц, в середньому 0,8 нм (практично від 0,78 до 0,82 нм). Але якщо говорити про робочий діапазон довжин хвиль, в яких утворюється такий ПЧЛТ, то використовується кілька таких діапазонів:

- С-діапазон  $\lambda$ -довжин хвиль;
- довгохвильова частина С-діапазону;
- L-діапазон  $\lambda$ -довжин хвиль;
- сумарний (C + L) – діапазон.

Це дозволяє в зазначених робочих діапазонах довжин хвиль одного волокна утворювати різну кількість ОТр - 16, 32, 40, 64, 80 і більше, що практично використовують вендери різношвидкісного обладнання PTS

DWDM. Наприклад, у відповідність з ПЧЛТ, в довгохвильовій частині С-діапазону довжин хвиль можна утворити 16 ОТр.(табл. 3.3.3.1)

Таблиця. 3.3.3.1 Утворення 16 ОТр С-діапазону.

$\lambda$ , нм	1528,77	1529,55	1530,33	1531,12	1531,90	1532,68	1533,47	1534,25
f, ТГц	196,1	196,0	195,9	195,8	195,7	195,6	195,5	195,4
$\lambda$ , нм	1559,79	1560,61	1561,42	1562,23	1563,04	1563,86	1564,68	1565,50
f, ТГц	192,2	192,1	192,0	191,9	191,8	191,7	191,6	191,5

Фрагменти початку і закінчення ПЧЛТ з рознесення 100 ГГц (0,8 нм), побудованого з використанням майже всього С-діапазону  $\lambda$ -довжин хвиль, наведені в табл. 6. Він утворюється при розширенні вліво і вправо, що дозволяє в діапазоні  $\lambda$ -длин хвиль: 1528,77 ... 1565,50 нм (діапазон  $f$ -частот: 196,1 ... 191,5 ТГц) одного волокна утворити 47 ОТр. Практично використовується більш вузький діапазон  $\lambda$ -довжин хвиль, фрагменти якого наведені в табл. 7. Він охоплює всю смугу частот підсилювача EDFA після корекції його АВХ. У зазначеному діапазоні частот можна отримати 40 Отр.

Таблиця.3.3.3.2. Рознесенні між сусідніми ОТр в 0,8 нм (100 ГГц)

Параметри	Значення (Рек. ITU-T G.692 в С-діапазоні), всього 40 значень								
№ п/п	1	2	3	4	...	37	38	39	40
$\lambda$ , нм	1528,77	1529,55	1530,33	1531,12	...	1558,17	1558,98	1559,79	1560,61
f, ТГц	196,1	196,0	195,9	195,8	...	192,4	192,3	192,2	192,1

Повний ПЧЛТ подібних PTSs є фрагментом плану, який показаний в табл. 8. У цій таблиці представлено ПЧЛТ, який утворюється в сумарному (C + L) – діапазоні  $\lambda$ -довжин хвиль і використовується в високошвидкісних PTS DWDM. У зазначеному діапазоні  $\lambda$ -довжин хвиль вони утворюють 80 ОТр з рознесенням 100 ГГц (0,8 нм)(рис.3.3.3.1).

(продовження)											
№ п/п	f, ТГц	$\lambda$ , нм	№ ОTr	№ п/п	f, ТГц	$\lambda$ , нм	№ ОTr	L-діапазон $\lambda$ - довжин хвиль			
C-діапазон $\lambda$ -довжин хвиль				C-діапазон $\lambda$ -довжин хвиль				L-діапазон $\lambda$ - довжин хвиль			
1	196,1	1528,77	1	24	193,8	1546,91	-	47	191,5	1565,50	-
2	196,0	1529,55	2	25	193,7	1547,71	-	48	191,4	1566,32	-
3	195,9	1530,33	3	26	193,6	1548,51	21	49	191,3	1567,14	-
4	195,8	1531,12	4	27	193,5	1549,31	22	50	191,2	1567,96	-
5	195,7	1531,90	5	28	193,4	1550,12	23	51	191,1	1568,78	-
6	195,6	1532,68	6	29	193,3	1550,92	24	52	191,0	1569,60	-
7	195,5	1533,47	7	30	193,2	1551,72	25	53	190,9	1570,42	41
8	195,4	1534,25	8	31	193,1	1552,52	26	54	190,8	1571,24	42
9	195,3	1535,04	9	32	193,0	1553,33	27	55	190,7	1572,06	43
10	195,2	1535,82	10	33	192,9	1554,13	28	56	190,6	1572,89	44
11	195,1	1536,61	11	34	192,8	1554,94	29	57	190,5	1573,71	45
12	195,0	1537,40	12	35	192,7	1555,75	30	58	190,4	1574,46	46
13	194,9	1538,19	13	36	192,6	1556,55	31	59	190,3	1575,37	47
14	194,8	1538,98	14	37	192,5	1557,37	32	60	190,2	1576,19	48
15	194,7	1539,77	15	38	192,4	1558,17	33	61	190,1	1577,02	49
16	194,6	1540,56	16	39	192,3	1558,98	34	62	190,0	1577,85	50
17	194,5	1541,35	17	40	192,2	1559,79	35	63	189,9	1578,68	51
18	194,4	1542,14	18	41	192,1	1560,61	36	64	189,8	1579,52	52
19	194,3	1542,94	19	42	192,0	1561,42	37	65	189,7	1580,35	53
20	194,2	1543,73	20	43	191,9	1562,23	38	66	189,6	1581,18	54
21	194,1	1544,52	-	44	191,8	1563,05	39	67	189,5	1582,02	55
22	194,0	1545,32	-	45	191,7	1563,86	40	68	189,4	1582,85	56
23	193,9	1546,12	-	46	191,6	1564,68	-	69	189,3	1583,69	57
								70	189,2	1584,52	58
								71	189,1	1585,36	59
								72	189,0	1586,20	60
								73	188,9	1587,04	-
								74	188,8	1587,88	-
								75	188,7	1588,72	-
								76	188,6	1589,56	-
								77	188,5	1590,41	-
								78	188,4	1591,25	61
								79	188,3	1592,10	62
								80	188,2	1592,95	63
								81	188,1	1593,79	64
								82	188,0	1594,64	65
								83	187,9	1595,49	66
								84	187,8	1596,34	67
								85	187,7	1597,19	68
								86	187,6	1598,04	69
								87	187,5	1598,89	70
								88	187,4	1599,74	71
								89	187,3	1600,60	72
								90	187,2	1601,45	73
								91	187,1	1602,31	74
								92	187,0	1603,17	75
								93	186,9	1604,02	76
								94	186,8	1604,88	77
								95	186,7	1605,74	78
								96	186,6	1606,60	79
								97	186,5	1607,46	80
								98	186,4	1608,32	-

Рисунок 3.3.3.1 Утворення 98 ОTr з рознесенням 100 ГГц (0,8 нм)

1. В L-діапазоні  $\lambda$ - довжин хвиль рознесення між сусідніми ОTr становить не 0,8 нм, а в середньому 0,84 нм (практично в межах від 0,82 до 0,86 нм). Представлений в табл.3.3.3.1 ПЧЛТ використовується не повністю. З потенційних 98 ОTr відомих PTSs утворюється тільки 80. Виняток становить PTS типу CoreStream (Ciena), яка утворює 192 ОTr з рознесенням 50 ГГц (0,4 нм). Очевидно, що ця PTS може утворювати 96 трактів і з рознесенням 100 ГГц (0,8 нм).

2. Зазначений ПЧЛТ охоплює не весь L-діапазон  $\lambda$ - довжин хвиль, що має праву граничну  $\lambda$ - довжину хвилі 1625 нм (див. Рис. Діапазони ОВ). З урахуванням всього L-діапазону довжин хвиль в ньому можна утворити 71 ОTr, Якщо табл.3.3.3.1 продовжити до  $\lambda$ - довжини хвилі 1624,89 нм (184,5 ТГц).

Тоді в сумарному (C + L) -Діапазони  $\lambda$ - довжин хвиль можна отримати не 80, а 117 ОТР, Т. Е. Майже в 1,5 рази більше. PTS технології HDWDM мають ПЧЛТ, у якого рознесення між створеними сусідніми ОТР становить 50 ГГц (0,4 нм). Такий ПЧЛТ план легко отримати з табл. 3.3.3.1, якщо в неї між рядками вписати нові значення  $f$ - частот ( $\lambda$ - довжин хвиль).

Наприклад показати по табл.3.3.3.3, між частотами 196,10 ТГц і 196,00 ТГц можна розташувати частоту 196,05 ТГц, між частотами 196,00 ТГц і 195,90 ТГц помістити частоту 195,95 ТГц і т. д. Цій послідовності частот 196,10 ТГц, 196,05 ТГц, 196,00 ТГц, 195,95 ТГц, відповідає послідовність довжин хвиль 1528,77 нм, 1529,16 нм, 1529,55 нм, 1529,94 нм і т. д.

Табл.3.3.3.4

$f$ -частоти, ТГц	196,10	*	196,00	*	195,90	.....
		↑↑ 196,05		↑↑ 195,95		
$\lambda$ -довжини хвиль, нм	1528,77	1529,16	1529,55	1529,94	1530,33	

Це означає, що в заданому діапазоні, наприклад в С-діапазоні  $\lambda$ -довжин хвиль ( $f$ -частот), PTS HDWDM дозволяє подвоїти число утворених ОТР в порівнянні з PTS DWDM. Певного типу обладнання також може працювати або в режимі "Технологія DWDM", або в режимі "Технологія HDWDM", утворюючи в неповному (C + L) -Діапазоні  $\lambda$ -довжин хвиль 1528,77 ... 1612,62 нм або 80 ОТР, Або 160 ОТР відповідно.

Розглянемо план частот лінійного тракту технологій NWDM. PTS технології NWDM будуються по ПЧЛТ, має рознесенням між створеними сусідніми ОТР 25 ГГц (0,2 нм). Фрагменти такого ПЧЛТ для С-діапазону  $\lambda$ -довжин хвиль наведені в (табл. 3.3.3.5).

Таблиця. 3.3.3.5. С-+ L-діапазони довжин хвиль

№ п/п	f, ТГц	$\lambda$ , нм	№ Отр	№ п/п	f, ТГц	$\lambda$ , нм	№ Отр
С-діапазон $\lambda$ - довжин хвиль				L-діапазон $\lambda$ - довжин хвиль			
1	196,100	1528,77	1	1	190,900	1571,50	161
2	196,075	1528,96	2	2	190,875	1571,70	162
3	196,050	1529,16	3	3	190,850	1571,91	163
4	196,025	1529,35	4	4	190,825	1572,12	164
5	196,000	1529,55	5	5	190,800	1572,32	165
6	195,975	1529,74	6	6	190,775	1572,53	166
7	195,950	1529,94	7	7	190,750	1572,73	167
8	195,925	1530,13	8	8	190,725	1572,94	168
104	193,100	1552,52	104	104	188,100	1594,89	264
105	193,075	1552,72	105	105	188,075	1595,10	265
106	193,050	1552,93	106	106	188,050	1595,32	266
107	193,025	1554,20	107	107	188,025	1595,53	267
108	193,000	1553,33	108	108	188,000	1595,74	268
109	192,975	1553,53	109	109	187,975	1595,95	269
110	192,950	1533,73	110	110	187,950	1596,16	270
111	192,925	1553,93	111	111	187,925	1596,38	271
152	191,900	1562,23	152	152	186,700	1605,74	312
153	191,875	1562,43	153	153	186,675	1605,96	313
154	191,850	1562,64	154	154	186,650	1606,17	314
155	191,825	1562,84	155	155	186,625	1606,39	315
156	191,800	1563,05	156	156	186,600	1606,60	316
157	191,775	1563,25	157	157	186,575	1606,82	317
158	191,750	1563,45	158	158	186,550	1607,03	318
159	191,725	1563,46	159	159	186,525	1607,25	319
160	191,700	1563,86	160	160	186,500	1607,46	320

Представлений ПЧЛТ PTS NWDM дозволяє в С-діапазоні  $\lambda$ -довжин хвиль 1528,77 ... 1560,61 нм одного волокна отримати 160 Отр, Тоді як PTS HDWDM в цьому ж діапазоні  $\lambda$ -довжин хвиль утворює 80 Отр, Застосування такого ПЧЛТ дозволило компанії Alcatel розробити PTS технології NWDM, яка в сумарному (С + L) - діапазоні  $\lambda$ -довжин хвиль одного волокна утворює 320 Отр.

### 3.3.4 Розрахунок параметрів передачі оптичних волокон

Розрахунок коефіцієнта загасання виконується на  $\lambda$  центральної оптичного каналу, попередньо визначивши в якому діапазоні вона лежить.

Результуючий коефіцієнт загасання волокна в дБм / км визначається як сума  $\alpha_{\text{макс}} = \alpha_{\text{pp}} + \alpha_{\text{ікп}} + \alpha_{\text{он}}$ .

Тут, складова втрат релєївського розсіювання на довжині хвилі  $\lambda$  визначається співвідношеннями  $\alpha_{PP} = (1 + \delta\alpha_{PP}) \cdot \bar{\alpha}_{PP}$  і  $\bar{\alpha}_{PP} = 6.3 \cdot 10^{11} / \lambda^4$ .

. Складова втрат інфрачервоного поглинання (ІКП) на довжині хвилі  $\lambda$  визначається за формулами:

$$\alpha_{\text{ІКП}} = (1 + \delta\alpha_{\text{ІКП}}) \cdot \bar{\alpha}_{\text{ІКП}} \text{ і } \bar{\alpha}_{\text{ІКП}} = 7,81 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-4.85 \cdot 10^4 / \lambda) \quad (3.14)$$

Складова втрат, обумовлена домішками ОН-, розраховується наступним чином:

$$\begin{aligned} \alpha_{OH} &= \begin{cases} \bar{\alpha}_{OH}, & \bar{\alpha}_{OH} \leq \alpha_{OH,max} \\ \alpha_{OH,max}, & \bar{\alpha}_{OH} > \alpha_{OH,max} \end{cases}, \text{ де} \\ \alpha_{OH,max} &= \alpha_{SE} - \alpha_{PP}(\lambda_{SE}) - \alpha_{\text{ІКП}}(\lambda_{SE}) \\ \bar{\alpha}_{OH} &= \frac{7 \cdot \Delta\alpha_{OH}}{49 + (\lambda - \lambda_{SE})^2} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Параметри  $\Delta\alpha_{OH}$ ,  $\delta\alpha_{PP}$ ,  $\delta\alpha_{\text{ІКП}}$  уточнюються для кожного конкретного типу ОВ в залежності від його технічних даних - значень максимальних втрат на опорних довжинах хвиль в діапазонах С, L і на довжині хвилі "водяного піку" діапазону Е.

Розрахунки виконуються в наступному порядку:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{OH} &= \alpha_{SE} - \bar{\alpha}_{PP}(\lambda_{SE}); \\ \Delta\alpha_{PP} &= \frac{\alpha_{SO} - \alpha_{OH}(\lambda_{SO})}{\bar{\alpha}_{PP}} - 1; \\ \delta\alpha_{\text{ІКП}} &= \frac{\alpha_{SC} - \alpha_{OH}(\lambda_{SC}) - \alpha_{PP}(\lambda_{SC})}{\bar{\alpha}_{\text{ІКП}}} - 1. \end{aligned}$$



$\alpha_{max} < \alpha_{SX} + \alpha_{\lambda}$ , де  $\alpha_{SX}$  - коефіцієнт загасання ОВ на опорній довжині хвилі, найближчої до спектрального діапазону, в якому лежить  $\lambda_C$  оптичного каналу, рівний, відповідно,  $\alpha_{SO}$ ,  $\alpha_{SE}$  або  $\alpha_{SC}$ . Якщо умова нерівності не виконується, слід вважати:  $\alpha_{max} = \alpha_{SX} + \Delta\alpha_{\lambda}$ .

Середнє значення коефіцієнта загасання оптичного волокна можна приблизно оцінити в такий спосіб:  $\bar{\alpha} = \alpha_{max} - 0,016$ .

Параметр хроматичної дисперсії стандартного ступеневої волокна в пс / (нм·км) розраховується за формулою  $D_{OB}(\lambda) = \frac{S_0}{4} (\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3})$ , де  $\lambda_0$  - довжина хвилі нульової дисперсії, нм;  $\lambda_C$  - центральна довжина хвилі, нм;  $S_0$  - параметр нахилу спектральної характеристики дисперсії оптичного волокна в точці нульової дисперсії, пс / (нм×км).

### 3.3.5 Розрахунок параметрів елементарної кабельної ділянки ВОЛП

Енергетичний потенціал - визначається як допустимі оптичні втрати оптичного тракту або кабельної ділянки між точками нормування, при яких забезпечується необхідну якість передачі цифрового оптичного сигналу. Оптичні втрати обумовлені втратами на загасання і додатковими втратами потужності, зумовленими впливом відображень, дисперсії, модових шумів і чірп-ефекту.

Енергетичний потенціал розраховується як різниця між рівнем потужності оптичного випромінювання на передачу і рівнем чутливості приймача:

$$W = p_{\text{пер}} - p_{\text{пр}} \quad (3.21)$$

де  $W$  - енергетичний потенціал (перекривається загасання), дБм;

$p_{\text{пер}}$  - рівень потужності оптичного випромінювання передавача ВОСП, дБм;

$p_{\text{пр}}$  - рівень чутливості приймача, дБм.

Приймач ВОСП характеризується як рівнем чутливості, так і рівнем перевантаження - максимальним значенням рівня потужності оптичного випромінювання в точці нормування оптичного тракту на прийомі, при яких забезпечується необхідну якість передачі цифрового оптичного сигналу. Різниця між рівнем перевантаження і рівнем чутливості приймача ВОСП визначає межі регулювання АРУ системи -  $\Delta A$ . Типове значення  $\Delta A = 20$  дБм. Передача інформації з необхідною якістю на регенераційному ділянці ВОЛП без оптичних підсилювачів, враховуючи втрати і дисперсійні спотворення, забезпечується за рахунок запасу потужності, рівного різниці між енергетичним потенціалом ВОСП і витратами оптичної потужності на втрати і придушення перешкод і спотворень оптичних імпульсів в лінії

$$A_{zz} = W - A_{\text{еку}} - \Sigma a_i \quad (3.21)$$

де  $A_{\text{еку}}$  - загасання ЕКУ спільно зі станційними кабелями (патчкордами);

$\Sigma a_i$  - сумарне значення додаткових втрат, дБ.

Для нормальної роботи ВОЛП необхідно, щоб експлуатаційний запас на ЕКУ перевищував нормоване мінімально допустиме значення рівне

$$A_{\text{здоп.}} = (A_{\text{ззл}} + A_{\text{ззк}}) \quad (3.22)$$

Тобто, виконувалася умова  $A_z > A_{\text{здоп.}}$ . Ця умова балансу бюджету потужності на ЕКУ. Максимальне значення загасання ЕКУ спільно зі станційними кабелями (патчкордами) розраховується наступним чином:

$$A_{\text{еку}} = \alpha_{\text{мак}} * L_{\text{ном}} + N_{\text{НС}} * A_{\text{НСмакс}} + A_{\text{рс}} \quad (3.23)$$

де  $N_{\text{НС}}$  - число нероз'ємних з'єднань ОВ на ЕКУ. Кількість нероз'ємних з'єднань на ЕКУ одне:

$$N_{\text{НС}} = \frac{L_{\text{макс}}}{l} + 1 \quad (3.24)$$

Сумарне значення додаткових втрат складається з додаткових втрат за рахунок власних шумів лазера, за рахунок за рахунок шумів через випромінювання оптичної потужності при передачі "нуля", за рахунок шумів межсимвольной інтерференції і, відповідно, так само:

$$\sum a_{III_i} = a_{RIN} + a_{\varepsilon} + a_{ISI} \quad (3.25)$$

Додаткові втрати через власних шумів джерела випромінювання розраховуються за формулою:

$$a_{RIN} = 10 \lg \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - (Q \cdot \sigma_{RIN})^2}} \right] \text{ и } \sigma_{RIN}^2 = 4 \cdot BW_R \cdot 10^{\frac{RIN}{10}} \quad (3.26)$$

Значення параметра власних шумів джерела - RIN зазвичай лежить в межах  $-120 < \sigma_{RIN} < -140$  дБм. Параметр Q визначається в залежності від заданого максимально допустимого коефіцієнта помилок BER з рівняння:

$$BER = \frac{1}{Q \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left( \frac{-Q^2}{2} \right) \quad (3.27)$$

Додаткові втрати за рахунок шумів через випромінювання оптичної потужності при передачі "нуля" визначаються за формулою:

$$a_{\varepsilon} = 10 \lg \left( \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \right), \quad (3.28)$$

де  $\varepsilon$  - відношення потужності оптичного випромінювання джерела при передачі "нуля" до потужності оптичного випромінювання при передачі "одиниці".

Як правило, значення цієї величини лежить в межах  $0,01 \leq \varepsilon \leq 0,1$ .

Параметр  $\varepsilon$  пов'язаний з коефіцієнтом загасання, рівним відношенню потужності оптичного випромінювання при передачі логічної одиниці цифрового сигналу до потужності оптичного випромінювання при передачі логічного нуля (вираз в дБм) [9].

Відповідно до вимог нормативно-технічної документації визначають значення номінальної, мінімальної і максимальної довжини елементарного кабельного ділянки (ЕКУ). Ці довжини ЕКУ визначаються бюджетом потужності ВОСП, втратами і дисперсією оптичного лінійного тракту. Вони розраховуються за такими формулами

$$\begin{aligned}
L_{НОМ} &= \frac{W - A_{ЭЗМ} - A_{РС} - A_{Д} + A_{НС\max} - A_{ЭЗК} - \Delta a}{\alpha_{\max} + A_{НС\max} / \bar{l}} \\
L_{МИН} &= \frac{W - \Delta A - A_{РС} + \bar{A}_{НС}}{\bar{\alpha} + \bar{A}_{НС} / \bar{l}} \\
L_{МАКС} &= \frac{W - A_{ЭЗМ} - A_{РС} - A_{Д} - \bar{B} \cdot \sqrt{L_{НОМ}} + \bar{A}_{НС} - A_{ЭЗК} - \Delta a}{\bar{\alpha} + \bar{A}_{НС} / \bar{l}}, \quad (3.30)
\end{aligned}$$

де -  $W$  - енергетичний потенціал ВОСП, дБ;

$A_{ЭЗМ}$  - експлуатаційний запас апаратури дБ;

$A_{ЭЗК}$  - експлуатаційний запас ОК, дБ;

$A_{РС}$  - втрати в роз'ємних з'єднаннях, дБ;

$A_{НС\max}$  - максимальне значення втрат нероз'ємного з'єднання, дБ;

$A_{НС}$  - середнє значення втрат нероз'ємного з'єднання, дБ;-

$A_{Д}$  - експлуатаційний запас енергетичного потенціалу на дисперсію, що враховується на регенераційних ділянках граничної довжини з оптичними підсилювачами, дБ;

$\Delta A$  - межі регулювання АРУ, дБ;

$\alpha_{\max}$  - максимальне значення коефіцієнта загасання ОВ, дБ / км;

$\alpha$  - середнє значення коефіцієнта загасання ОВ, дБ / км;

$l$  - середня будівельна довжина ОК, км;

$\Delta a$  - похибка вимірювання загасання, дБ.

Параметр  $B$  визначається за формулою:

$$\bar{B} = \frac{3 \cdot 0.8}{2 \cdot \lambda^4 \cdot \sqrt{12}} \cdot \sqrt{1 + 1/\bar{l}}, \quad (3.31)$$

де  $\lambda$  - робоча довжина хвилі, мкм.

Будівельна довжина ОК лежить в межах від 1,0 км до 6,0 км. Її середнє значення становить 4,0 км.

Згідно з умовами на регенераційному ділянці немає лінійних оптичних підсилювачів і компенсаторів дисперсії, то довжини ЕКУ обмежені і в першому наближенні при розрахунках будемо вважати  $A_{Д} = 0$  дБ.

Довжина регенераційної ділянки ВОЛП обмежується не тільки загасанням, а й дисперсією лінії передачі. Допустимі значення хроматичної

та поляризаційної модової дисперсії на регенераційному ділянці ВОЛП залежать від швидкості передачі лінійної кодової послідовності. У разі застосування коду NRZ і модуляції без чірпа відповідно до рекомендацій ITU-T максимально допустимі для РУ значення хроматичної дисперсії  $D_{PY}$  в пс / нм і поляризаційної модової дисперсії  $PMD_{PY}$  в пс при погіршенні ставлення ЗСШ не більше, ніж на 1,0 дБ, визначаються за формулами:

$$D_{PY} = 104000 / B^2 \text{ н } PMD_{PY} = 140 / B \quad (3.32)$$

де  $B$  - швидкість передачі в лінії, Гбіт/с.

Наведене до одного кілометру довжини лінії передачі значення хроматичної дисперсії  $OV$  визначається формулою  $D_{ch} = D_{OV} \cdot \Delta\lambda$ , де  $D_{OV}$  - значення параметра дисперсії оптичного волокна, яке визначається по його технічними даними, пс / (нм. км);  $\Delta\lambda$  - ширина лінії випромінювання лазера, нм.

Прогнозовані значення хроматичної дисперсії на ЕКУ визначаються, відповідно, наступним чином:

$$D_{НОМ} = D_{ch} \cdot L_{НОМ} \quad D_{МИН} = D_{ch} \cdot L_{МИН} \quad D_{МАКС} = D_{ch} \cdot L_{МАКС} \quad (3.33)$$

А прогнозовані значення поляризаційної модової дисперсії розраховуються за формулами:

$$PMD_{НОМ} = PMD \cdot \sqrt{L_{НОМ}} \quad PMD_{МИН} = PMD \cdot \sqrt{L_{МИН}} \quad PMD_{МАКС} = PMD \cdot \sqrt{L_{МАКС}} \quad (3.34)$$

Значення експлуатаційний запасу на дисперсію одно додаткових втрат (приросту рівня перешкод) через шумів межсимвольной інтерференції (ISI), які включають в себе перехресні перешкоди і шуми синхронізації. Тобто  $D_{ISI} A = a$ . Ці додаткові втрати рівні

$$a_{ISI} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{1 - 1,425 \cdot \exp \left[ -1,28 \cdot \left( \frac{T_0}{T_L} \right) \right]} \right\}, \quad (3.35)$$

де  $T_0$  - час наростання фронту оптичного імпульсу на виході джерела випромінювання від 10% до 90% його максимального значення, с;

TL - Час наростання фронту оптичного імпульсу на виході оптичного приймача від 10% до 90% його максимального значення, с.

Час наростання фронту оптичного імпульсу на виході джерела випромінювання визначається як

$$T_0 = \frac{0,48}{B}. \quad (3.35)$$

Час наростання фронту оптичного імпульсу на виході оптичного приймача розраховується за формулою:

$$T_L = \sqrt{T_0^2 + \left(\frac{0,35}{BW_R}\right)^2 + \sigma_{\text{ЭКУ}}^2}. \quad (3.36)$$

де  $BW$  - смуга пропускання фотоприймача, Гц;

$\sigma_{\text{ЭКУ}}$  - середньоквадратичне значення дисперсії на ЕКУ, с.

Смуга пропускання фотоприймача вибирається з умови  $BW \geq BL$ .

Прогнозоване середньоквадратичне значення дисперсії на номінальній довжині ЕКУ розраховується за формулою:

$$\sigma_{\text{ЭКУ}} = \sqrt{D_{\text{ном}}^2 + PMD_{\text{ном}}^2} \quad (3.37)$$

Око-діаграма являє собою результат багаторазового накладення бітових послідовностей з виходу генератора псев випадкової послідовності (ПСП), що відображається на екрані осцилографа в вигляді діаграми розподілу амплітуди сигналу за часом. Приклад око-діаграми представлений на рисунку 3.23.[9]

Попередньо обчисліть рівень потужності джерела оптичного випромінювання лазера, дБ:

$$P_0 = 10 \lg \left( \frac{P_0}{10^{-3}} \right), \text{ дБ}, \quad (3.38)$$

Де  $P_0$  - рівень потужності на виході джерела оптичного випромінювання.

Рівень потужності оптичного сигналу на вході фотоприймача ВОСП визначається сумарними втратами в ОВ на ЕКУ ВОЛП а також сумарним значенням додаткових втрат:

$$P_L = P_0 - A_{\text{ЭКУ}} - \sum a_{\text{ш}}, \text{ дБ}. \quad (3.39)$$

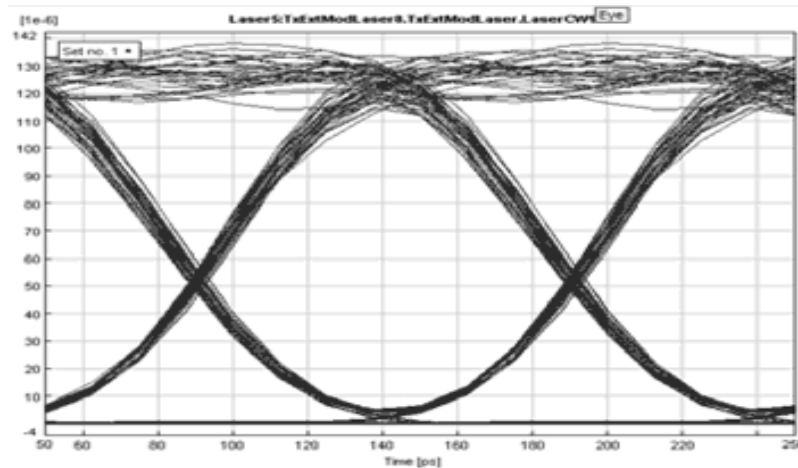


Рисунок 3.23 Око-діаграма, отримана за допомогою аналізатора каналу  
Наведена до входу фотоприймача ВОСП потужність оптичного сигналу в мВт:

$$P_L = 10^{0,1 \cdot P_L}, \text{ мВт.} \quad (3.40)$$

Для розрахунку завадозахищеності каналу ЦСП необхідно також оцінити потужність шуму фотоприймача  $P_{\text{noise}}$ . На практиці фотоприймальні пристрої високошвидкісних ВОСП проектуються таким чином, щоб логарифм відносини смуги пропускання електричного фільтра до смуги пропускання оптичного фільтра становив не менше 2 дБ. В цьому випадку виконується така умова по відношенню сигнал/шум:

$$OSNR = 20 \cdot \lg(Q_{\text{ном}}) + 2, \text{ дБ,} \quad (3.41)$$

Де OSNR - оптичне відношення сигнал / шум (Optical Signal-to-Noise Ratio);

$Q_{\text{ном}}$  - номінальне значення Q-фактора, відповідного нормированному коефіцієнту помилок  $BER_{\text{ном}}$ .

Згідно з визначенням, рівень чутливості фотоприймача ВОСП - це мінімальне значення рівня потужності оптичного випромінювання в точці нормування оптичного тракту на прийомі, при яких забезпечується необхідну якість передачі цифрового оптичного сигналу. З урахуванням вищесказаного, максимальний рівень потужності шуму фотоприймача  $p_{\text{noise}}$  можна оцінити за такою формулою:

$$P_{\text{noise}} = P_R - 20 \cdot \lg(Q_{\text{ном}}) - 2, \text{ дБ,} \quad (3.41)$$

Де  $p_R$  - рівень чутливості фотоприймача, дБ;

$p_{noise}$  - рівень шуму фотоприймача, дБ.

Чутливість фотоприймача і потужність шуму в мВт розраховується як:

$$P_R = 10^{0,1 \cdot p_R}, \text{ мВт}; P_{noise} = 10^{0,1 \cdot p_{noise}}, \text{ мВт}. \quad (3.42)$$

Побудова око-діаграми здійснюється шляхом накладення відгуку системи в припущенні гаусом форми імпульсу на передачу "ізолюваного" логічного "0" в послідовності логічних "1" (наприклад, комбінація 101 - при 3-х символного послідовності):

$$P_{out}^{0n}(t) = P_L \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[ \frac{(t+T)}{s_L \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right) \right\}, \quad (3.43)$$

і відгуку системи на передачу "ізолюваною" логічної "1" в послідовності логічних "0" (наприклад, комбінація 010 - при 3-х символного послідовності)

$$P_{out}^{1n}(t) = P_L \cdot \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[ \frac{(t+T)}{s_L \sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right) \right\}, \quad (3.44)$$

де  $s_L$  – середньоквадратична тривалість гаусівського імпульсу на виході фотоприймача ОСП;

Дана величина безпосередньо пов'язана з  $T_L$  наступним співвідношенням:

$$s_L = \frac{T_L}{2,563}, \text{ с}; \quad (3.45)$$

$T$  - інтервал передачі бітової послідовності:

$$T = N_{symb} \cdot \tau_{05}, \text{ с}, \quad (3.46)$$

Де  $N_{symb}$  - кількість символів бітової послідовності, в даному випадку прийняти  $N_{symb} = 3$ ;

$\tau_{05}$  - тривалість імпульсу на рівні 0,5 від його максимуму на виході джерела оптичного випромінювання; обернено пропорційна швидкості

передачі сигналу в лінії:  $\tau_{05} = \frac{1}{B_L}, \text{ с}$ . Побудова око-діаграми в діапазоні  $(-2.T; 2.T)$ . На діаграмі вказують потужність шуму фотоприймача, а також, по можливості, чутливість фотоприймача (якщо потужність сигналу на виході фотоприймача  $P_L$  і чутливість фотоприймача  $P_R$  - одного порядку). Приклад побудови око-діаграми на рисунку 3.24.



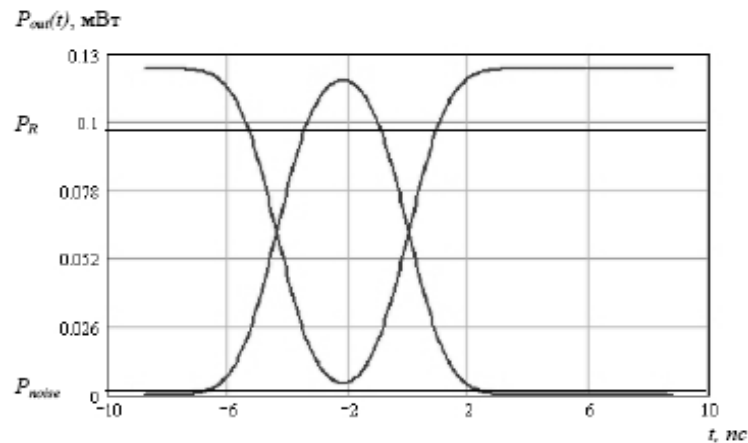


Рисунок 3.24 Приклад побудови око-діаграми

Робота ЦСП вважається нормальною тільки в тому випадку, якщо BER не перевищує певний допустиме значення, відповідне використовуваному мережевого стандарту. Відома методика оцінки коефіцієнта помилок BER на основі визначення Q-фактора. Q-фактор - це параметр, який безпосередньо відображає якість сигналу цифрового СП. Існує певна функціональна залежність Q-фактора сигналу і вимірюваного коефіцієнта помилок BER. Q-фактор визначається шляхом статистичної обробки результатів вимірювання амплітуди і фази сигналу на електричній рівні, а саме - безпосередньо по око-діаграмі. При цьому виконується побудова функції розподілу станів "1" і "0", а для цих розподілів, в припущенні їх гаусівської форми, оцінюються математичні очікування станів  $E_1$  і  $E_0$  і їх середньоквадратичне відхилення  $\delta_1$  і  $\delta_2$ . Попередньо, для оцінки параметрів розподілів станів "1" і "0", визначають точку максимального розкриття око-діаграми (рис. 3.25):

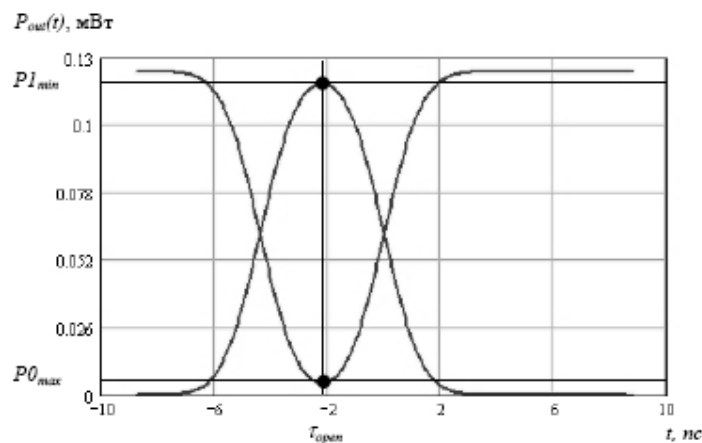


Рисунок 3.25 Оцінка параметрів розподілів логічних станів "1" і "0".

Розраховують кордону розкриття око-діаграми (зони прийняття рішення), відповідні мінімальній зареєстрованій потужності при передачі логічної "1"  $P_{1\min}$  і максимальній зареєстрованій потужності при передачі логічного "0"  $P_{0\max}$ :

$$P_{1\min} = P_{out}^{''1''}(\tau_{open}), \text{ мВт} \quad P_{0\max} = P_{out}^{''0''}(\tau_{open}), \text{ мВт} \quad (3.47)$$

Виходячи з припущення гаусівського розподілу станів логічного "1" і логічного "0", визначте характеристики розподілів станів - математичне очікування  $E1$  і  $E0$ :

$$E1 = \begin{cases} P_L, & P_L \geq P_R, \text{ мВт} \\ P_R, & P_L < P_R \end{cases}, \quad E0 = P_{noise}, \text{ мВт} \quad (3.48)$$

і середньоквадратичне відхилення  $\sigma_1$  і  $\sigma_0$ , відповідно, скориставшись правилом "три сигма":

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P_{1\min}}{3}, \text{ мВт} \quad \sigma_0 = \begin{cases} \frac{E0 + P_{0\max}}{3}, & E0 \leq P_{0\max} \\ \frac{E0 - P_{0\max}}{3}, & E0 > P_{0\max} \end{cases}, \text{ мВт}. \quad (3.49)$$

Q-фактор розраховується за такою формулою:

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.50)$$

При цьому сам коефіцієнт помилок BER визначається за такою формулою:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right), \quad (3.51)$$

де  $\operatorname{erfc}$  - допоміжна функція інтеграла помилок:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta. \quad (3.52)$$

### 3.3.6 Визначення довжини регенераційної ділянки

Довжина регенераційної ділянки волоконно-оптичних ліній зв'язку визначається передавальними параметрами кабелю: його коефіцієнтом загасання  $\alpha$  й дисперсією  $\tau$ . Загасання кабелю приводить до зменшення переданої потужності, що відповідно обмежує довжину регенераційної ділянки. Дисперсія кабелю призводить до розширення переданих імпульсів, що, у свою чергу, також накладає обмеження по пропускній здатності кабелю ( $\Delta F$ ). Довжина регенераційної ділянки вибирається за найменшим значенням  $l_a$  або  $l_{\Delta F}$ , але так, щоб не були перевищені допустимі значення по загасанню тракту ( $a_{\text{доп=al}}$ ) і пропускної здатності ( $\Delta F_{\text{доп}}$ ).

Енергетичний потенціал обладнання ВОСПІ – це різниця між рівнями потужності оптичного сигналу в дБм на виході передавальної частини  $p_{\text{дв}}$  і на вході приймальної частини обладнання ВОСПІ  $p_{0\text{min}}$  ( $p_{\text{порогове}}$ ), при якому коефіцієнт помилок регенерації сигналу в ПРОМ не перевищує значення, встановлене для заданої ЦСП.

$$Q = p_{\text{дв}} - p_{0\text{min}} [\text{дБн}] \quad (3.16)$$

З іншого боку енергетичний потенціал – це запас потужності випромінювання, який витрачається при проходженні сигналу від джерела випромінювання до входу ФД.

$$Q = 10 \lg \frac{P_{\text{дв}}}{P_0} \quad (3.17)$$

Для якісного сприйняття приймачем оптичного сигналу необхідно вибрати запас стійкості (експлуатаційний запас), він як правило складає 3 дБ. Типовими втратами, які виникають у волоконно-оптичному тракті є втрати на стиках:

1) джерело випромінювання – оптичне волокно ( $a_{\text{дв-ов}}$ ) і залежить від типів використаних джерел і оптичних волокон, способів їх з'єднання і пристроїв узгодження хвильових фронтів джерела і оптичного волокна, в

загальному випадку для довжини хвилі 1,3 та 1,55 мкм в одномодовому оптичному волокні  $\alpha_{ДВ-ОВ}$  складає 1 дБ.

2) оптичне волокно – оптичне волокно ( $\alpha_{зв}$ ) – залежить від способу стикування волокна, при використанні нероз’ємного з’єднання, утвореного зваркою; втрати для довжин хвиль 1,3 та 1,55 мкм в одномодовому оптичному волокні  $\alpha_{зв}$  складає 0,1 дБ.

3) оптичне волокно – приймач ( $\alpha_{ОВ-ФД}$ ) – залежить від величини втрат внаслідок відбивання від торця оптичного волокна і світлочутливої поверхні приймача, аналогічно як у випадку джерело випромінювання – оптичне волокно ці втрати складають 1 дБ при умові використання одномодового оптичного волокна з довжиною хвилі випромінювання 1,3 та 1,55 мкм. [7].

Отже. Вираз для розрахунку максимальної довжини регенераційної ділянки по потужності (загасанню) матиме вигляд:

$$L_{p1\max} = \frac{Q - \alpha_{ДВ-ОВ} - \alpha_{ОВ-ФД} - N \cdot \alpha_{зв} - A_3}{\alpha} \quad (3.18)$$

Де:  $N$  – кількість зварок,  $\alpha$  – загасання оптичного волокна на 1 км.

Якщо на ділянці регенерації всі будівельні довжини однакові, тобто  $l_{б1} = l_{б2} = \dots = l_{бyд}$  і загасання кожної ділянки волоконно-оптичної лінії є однакові  $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha$ , то вираз для розрахунку максимальної довжини регенераційної ділянки матиме вигляд:

$$L_{p1\max} = \frac{Q - \alpha_{ДВ-ОВ} - \alpha_{ОВ-ФД} - \alpha_{зв} - A_3}{\alpha + \frac{\alpha_{зв}}{l_{бyд}}}, \quad \text{км} \quad (3.19)$$

а мінімальна довжина регенераційної ділянки:

$$L_{p1\min} = \frac{Q - A - \alpha_{ДВ-ОВ} - \alpha_{ОВ-ФД} - \alpha_{зв} - A_3}{\alpha + \frac{\alpha_{зв}}{l_{бyд}}}, \quad \text{км} \quad (3.20)$$

Де:  $A$  – діапазон АРП приймальної частини обладнання ПРОМ, дБ і як правило складає 4-6 дБ.

Методика розрахунку довжини регенераційної ділянки за дисперсією

Для розрахунку дисперсії необхідно врахувати три основні фактори, які накладають обмеження на швидкість передавання інформації:

- тривалість фронту імпульсу ПОМ,  $\tau_i$ ;
- збільшення тривалості фронту імпульсу, внаслідок сумарної дисперсії в оптичному волокні довжиною  $L$ , с:

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_{\text{мод}}^2 + (\sigma_{\text{мат}} + \sigma_{\text{хв}})^2}, \quad \text{нс/км} \quad (3.21)$$

яка складається в загальному випадку з модової (міжмодової)  $\delta_{\text{мод}}$ , матеріальної  $\delta_{\text{мат}}$  і хвилевідної  $\delta_{\text{хвл}}$  дисперсій;

- збільшення тривалості фронту імпульсу внаслідок інерційності ПРОМ,  $\tau_{\text{п}}$ .

Тривалість фронту імпульсу після проходження ділянки регенерації визначається так:

$$\tau_p = \sqrt{(\tau_i^2 + \sigma_L^2 + \sigma_{\text{п}}^2)}, \quad \text{нс/км} \quad (3.22)$$

Тривалість фронту імпульсу на виході ПРОМ регенератора не повинна перевищувати  $\tau_{\text{доп}} = 0,7 T$  для NRZ і  $\tau_{\text{доп}} = 0,35 T$  для RZ формату коду, де  $T=1/B$  – тривалість тактового інтервалу для швидкості передавання інформації  $B$ , біт/с. Отже, для формату коду NRZ і системи синхронного передавання STM-4 зі швидкістю передавання 622 Мбіт/с:

$$\tau_{\text{доп}} = 0,7 \cdot T = 0,7 \cdot \frac{1}{B} = 0,7 \cdot \frac{1}{0,622 \cdot 10^9} = 11 \text{ нс} \quad (3.33)$$

Для формату коду NRZ і системи синхронного передавання STM-16 зі швидкістю передавання 2,5 Гбіт/с:

$$\tau_{\text{доп}} = 0,7 \cdot T = 0,7 \cdot \frac{1}{B} = 0,7 \cdot \frac{1}{2,5 \cdot 10^9} = 28 \text{ нс} \quad (3.34)$$

Для формату коду RZ і системи синхронного передавання STM-4 зі швидкістю передавання 622 Мбіт/с:

$$\tau_{don} = 0,35 \cdot T = 0,35 \cdot \frac{1}{B} = 0,35 \cdot \frac{1}{0,622 \cdot 10^9} = 5,5 \text{ нс} \quad (3.35)$$

Для формату коду RZ і системи синхронного передавання STM-16 зі швидкістю передавання 2,5 Гбіт/с:

$$\tau_{don} = 0,35 \cdot T = 0,35 \cdot \frac{1}{B} = 0,35 \cdot \frac{1}{2,5 \cdot 10^9} = 14 \text{ нс} \quad (3.36)$$

Тривалість фронту імпульсу ПОМ  $\tau_i$  визначається швидкодією джерела випромінювання і елементів його насичення. В наближенні за  $\tau_i$  може бути прийнята величина, зворотна максимальній частоті модуляції джерела, при умові гаусівської форми імпульсу, пс:

$$\tau_i = \frac{440}{F_{0.5}}, \text{ пс}$$

(3.37)

де:  $F_{0.5}$  – ширина смуги пропускання джерела по рівню половинної потужності, МГц.

Збільшення тривалості фронту імпульсу в ПРОМ, тобто дисперсія, що вноситься в ПРОМ, нс:

$$\tau_{II} = \frac{350}{F_{0.5}}, \text{ нс} \quad (3.38)$$

Де:  $F_{0.5}$  – ширина смуги пропускання ПРОМ по рівню половинної потужності, МГц. [6].

Значення  $\tau_{II}$  може бути співставлене із тривалістю тактового інтервалу для виділення достатньої швидкодії комбінації джерело випромінювання – оптичне волокно – приймач при довжині  $L$  для заданого формату коду передавання інформації. Існує критична (максимально допустима) швидкість передавання інформації,  $B_{кр}$ , біт/с:

$$B_{кр} = \frac{a}{4 \cdot \sigma_1 \cdot \omega}, \text{ біт/с} \quad (3.39)$$

де:  $\omega = p_{ДВ} - p_{0\min} - a_{ДВ-ОВ} - a_{ОВ-ФД} = Q - a_{ДВ-ОВ} - a_{ОВ-ФД}$ ,

$\delta$ – сумарна кілометрична дисперсія оптичного волокна відповідної марки.

Якщо швидкість передавання інформації більша, ніж критична, то тракт передавання обмежений дисперсійними спотвореннями і максимальна довжина ділянки регенерації:

$$L_{p2} = \frac{1}{4 \cdot \sigma_1 \cdot B}, \text{ км} \quad (3.40)$$

Ця величина визначає необхідність встановлення пристроїв компенсації дисперсії на лінії між окремими містами.

В іншому випадку ( $B < B_{кр}$ ) тракт передавання обмежений загасанням і максимальна довжина ділянки регенерації визначається загасаннями, які в ній виникають.

Таблиця 3.3.6.1- Довжини регенераційних ділянок із врахуванням різних видів оптичних волокон

Тип волокна	Довжина хвилі, нм	Загасання, дБ/км	Довжина регенераційної ділянки по загасанню, км	
			Мінімальна	максимальна
Corning SMF-LS	1310	0,5	164	174
	1383	2	47	49
	1550	0,25	282	299
	1285-1330	0,3	247	262
	1525- 1565(75)	0,3	247	262
	1565-1625	0,3	247	262

Отже, при розрахунку ВОСПІ в загальному випадку необхідно виконати два розрахунки довжини регенераційної ділянки ( $L_{p1}$ ,  $L_{p2}$ ) і вибрати найменше значення. Розраховані дані мінімальної і максимальної довжини регенераційної ділянки із врахуванням різних видів оптичних волокон та довжин робочих хвиль наведені у (табл.3.3.6.1)

Розраховані значення дисперсії для кожного виду волокна та максимальна довжина регенераційної ділянки при врахуванні дисперсії подані у (табл.3.3.6.2).

Зазначені коефіцієнти майже рівні за абсолютною величиною і протилежні за знаком в широкому (1,1 ... 1,7 мкм) діапазоні довжин хвиль. В результаті відбувається їх взаємна компенсація і результуючий  $R(\lambda)$  не перевищує значення 3 ... 5 пс/(км × нм), тобто має малі величини в тому ж діапазоні довжин хвиль, де  $\alpha$  ООВ має мінімальні значення. Довжина хвилі, при якій результуючий коефіцієнт  $R(\lambda)$  приймає нульове значення, називається довжиною хвилі нульової дисперсії ( $\lambda_0$ ).

Таблиця 3.3.6.2 - Значення дисперсії та максимальної довжини регенераційної ділянки для кожного виду волокна

Тип волокна	Вид дисперсії	На довжині хвилі, нм	Значення дисперсії, пс/км	Сумарна кілометрична дисперсія, пс/км	Максимальна довжина регенераційної ділянки, км
Corning SMF-LS	Хроматична	1310	0,5	Для довжини хвилі 1310 нм – 1,05пс/км	Для STM-16 становить 95
		1550	2		Для STM-4 становить 384
	Матеріальна	1310	0,25	Для довжини	Для STM-16 становить 38
		1550	0,3		
	Поляризованої	1310	0,3		



	МОДИ			хвилі 1550 нм – 2,6 пс/км	Для STM-4 становить 154
		1550	0,3		

Для передачі по лінійному ООВ сигналу  $\lambda_{1+2+\dots+N}$  деякої ТС ХМ потрібні десятки або сотні довжин хвиль в заданому діапазоні. Умови передачі зазначеного сигналу по лінійному волокну за критерієм мінімуму рівня шумів на виході утворених ОТр вважаються оптимальними в тому випадку, коли у всьому використовуваному діапазоні довжин хвиль ООВ заданої довжини його результуючий коефіцієнт  $R(\lambda)$  малий, але не дорівнює нулю. У ТС ХМ найбільші перехідні перешкоди між ОТр виникають на довжинах хвиль  $\lambda_0$ , де в максимальному ступені проявляються нелінійні ефекти в трактах передачі. У ООВ з нульовою (зміщеною або не зміщеною) дисперсією оптичні складові з меншою частотою, тобто більшою довжиною хвилі, мають більшу швидкість поширення, ніж високочастотні складові. Це призводить до зустрічі перших оптичних складових з другими, що викликає биття і осциляцію на задніх фронтах оптичних імпульсів, і веде до розширення спектра сигналів. Тоді, наприклад, для зменшення фазової самомодуляції і фазової крос-модуляції, в PTS ХМ бажано застосовувати ООВ з ненульовий зміщеною дисперсією з невеликим нахилом коефіцієнта питомої хроматичної дисперсії до осі довжин хвиль.

Подібні властивості ООВ і ТС ХМ дозволяють визначити мінімально граничні межі дисперсії волокна для роботи по них багатохвильових транспортних систем. З цією метою застосовуються графіки залежності коефіцієнтів  $B(\lambda)$  (крива 1) і  $M(\lambda)$  (криві 2, 3, 4) від довжини хвилі оптичного випромінювання для чистого кварцового волокна із заданими параметрами, що надані на рисунку.

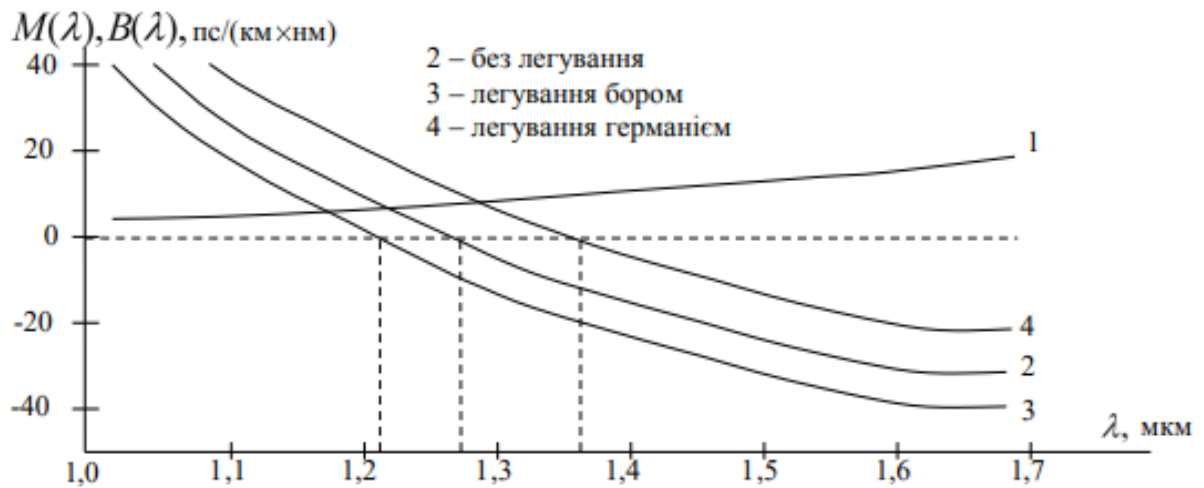


Рисунок 3.8 - Залежність коефіцієнтів  $B(\lambda)$  (крива 1) і  $M(\lambda)$  (криві 2, 3, 4)

В результаті аналізу розглянутих залежностей складаються межі гранично мінімальних значень дисперсії як для всього діапазону дальнього оптичного зв'язку ITU-T G.652, так і для окремих піддіапазонів, наприклад, для С-діапазону, що є характерним для роботи ТТМ України, яка сформована, взагалі, ТС ХМ за технологією щільного ХМ (DWDM).

Багатомодові ВС характеризуються шириною смуги пропускання за рівнем – 3дБ, який нормується на довжину лінії 1 км

$$\Delta F_{-3\text{дБ}} = \frac{0,44}{\tau}, \frac{\text{Гц}}{\text{км}} \quad (3.41)$$

та широкосмуговістю, що дорівнює добутку ширини смуги пропускання на відстань

$$Fl = \Delta F_{-3\text{дБ}} * L \quad (3.42)$$

Межа одномодового режиму ВС визначається

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405, \quad (3.43)$$

де:  $a$  – радіус ВС,  $\lambda$  – довжина хвилі оптичної несучої. Кількість хвиль, які розповсюджується у багатомодовому східчастому ВС дорівнює

$$N \approx V^2/2, \text{ а в градієнтному } -N \approx V^2/4.$$

З одержаних розрахунків довжини регенераційної ділянки вибирається менше значення.

### 3.4 Висновки по розділу 3

У даній частині роботи систематизовані вихідні дані, необхідні для побудови і введення в експлуатацію магістральної волоконно-оптичної системи передачі зі спектральним ущільненням.

У розділі проведено розрахунок параметрів оптичного лінійного тракту ВОСП зі спектральним ущільненням, розглянуті особливості структури ОЛП, здійснено вибір робочої довжини хвилі, розроблена таблиця плану частот лінійного тракту, а також проведена оцінка параметрів оптичного волокна. Розроблена методика розрахунку ділянки ретрансляції.

Було обрано обладнання джерела випромінювання і фотоприймача, здійснено порівняння параметрів з обладнанням іншого типу, здійснено розрахунок збільшення пропускної спроможності у третьому вікні прозорості.

Побудована та розглянута узагальнена структурна схема ВОСП без пристроїв компенсації і лінійних підсилювачів. Здійснено розрахунок основних параметрів передачі сигналу по оптичних волокнах.

## ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації було розглянуто явища, які впливають на передачу світлового сигналу у оптоволоконному середовищі. В результаті аналізу методів мультиплексування та частотного розділення сигналів було встановлено, що на фізичному рівні покращити якісні характеристики оптичного каналу передачі інформації, можна вдосконаленням технології виготовлення оптоволоконного кабелю та укладанням в нової лінії зв'язку.

Цей процес пов'язаний з необхідністю довгострокового планування, великих капіталовкладень і не завжди можливий. Справа в тому, що велика частина встановленої бази кабелів використовує одномодове оптоволокно, для якого дисперсія у вікні прозорості 1550 нм виявляється занадто високою. В результаті для ефективної передачі необхідно прокладати або відрізки кабелю з дисперсією протилежного знаку, або повністю нове волокно зі зміщеною ненульовою дисперсією (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber - NZDSF).

Крім цього, збільшення швидкості передачі призводить до високої щільності потоку випромінювання на досить протяжних ділянках. Це, в свою чергу, викликає нелінійні оптичні ефекти, в результаті яких спотворюється форма хвилі.

Обрунтовано, що для збільшення пропускної здатності оптоволоконної лінії передачі інформації використовують технології мультиплексування, що можуть використовувати вже наявні лінії зв'язку.

При порівнянні існуючих методів мультиплексування було виявлено, що найкращими характеристиками володіють системи WDM. Технологія WDM дозволяє суттєво збільшити пропускну здатність лінії зв'язку, дає можливість організувати двосторонню передачу даних по одному волокну, причому нарощування пропускної здатності може відбуватись на вже існуючому волоконно-оптичному кабелі. У системі WDM сигнали різних довжин хвиль, що генеруються одним або декількома оптичними

передавачами, поєднуються мультиплексором у багаточастотний груповий оптичний сигнал, що поширюється далі по одномодовому ОВ

Вище викладені факти показують, що з висновками зробленими в даній магістерській дисертації в теперішній час та майбутньому будуть стикатися багато операторів зв'язку. Адже вирішення проблеми нестачі пропускної спроможності оптоволоконних магістралей буде залишатися актуальним ще довгий час.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хмелев К.Ф. Основы фотонного транспорта. – Киев: Техніка. 2008. – 680 с.
2. Бердников О.М., Хмельов К.П. Застосування технології *WDM* на телекомунікаційних мережах. / Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2003. – № 3. – с. 5...11.
3. Каток В.Б., Руденко І.Е., Ранський Є.Г., Однорог П.М. Волоконно-оптичний зв'язок / Під ред. Катка В.Б. – К.: Логос, 2015 – 383 с.:іл
4. Бердников О.М., Щирий А.В. Напрямки побільшування швидкостей передачі лінійних трактів телекомунікаційних транспортних систем. XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 75...77.
5. А. Л. Дмитриев. Оптические системы передачи информации / учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2007. – 96 с.
6. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Омецінська О. Б. *WDM* під редакцією Катка В. Б. – Київ, 2005. – 194с.
7. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Котенко М. О., Омецінська О. Б. Оптичні мережі доступу (xPON) під редакцією Катка В. Б. – Київ, 2006. – 65с.
8. Андрэ Жирар руководство по технологии и тестированию систем *WDM* М.: EXFO, 2001. / Пер с англ. под ред. А.М. Бродниковского, Р.Р. Убайдулаева, А.В.Шмалько. 265с.
9. Проектирование и техническая эксплуатация систем передачи: Учебник для вузов / І.Р. Берганов, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев -М.: Радио и связь, 1989.
10. Бердников О. М. Варіанти побудови мінімальної граничної дисперсії в оптичному волокні для багатохвильових систем передачі //

Бердников О. М. Позняк А.А. Чіжмодій О.Я.// Сучасні інформаційні технології та кібербезпека (Київ 15-16 листопада) 2018. с. 98-99.

## ДОДАТОК А